



**Tesis Monográfica para optar al Título de  
Ingeniero en Computación**

**Título**

**Análisis comparativo de modelos de propagación en un sistema  
wimax 2.3 ghz y 3.5 Ghz.**

**Autores:**

**Br. Ruiz Ibarra, Omar Alberto  
Br. Flores Duarte, Mauricio José**

**Tutor:**

**Hernández García, Enrique José**

**Managua, 2014**

## DEDICATORIA

*Principalmente dedicamos este trabajo a nuestros padres puesto que nos brindaron apoyo y fortaleza en el desarrollo y transcurso de este, ayudándonos a concluir satisfactoriamente.*

*Dedicamos a Dios puesto que nos brinda sabiduría, amor y paciencia, nos ayuda en los momentos más difíciles brindándonos valores que nos fortalezcan no solo como trabajo de grupo, si no como personas.*

*También dedicamos a nuestro tutor quien nos dio su sabiduría para la elaboración total de nuestra tesis haciendo así posible el desarrollo total de esta.*

## **RESUMEN**

IEEE 802.16 o WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), es una potente solución a las necesidades de redes de acceso inalámbricas de banda ancha, de amplia cobertura y elevadas prestaciones. Ofrece una gran capacidad (hasta 75 Mbps por cada canal de 20 MHz), e incorpora mecanismos para la gestión de la calidad de servicio (QoS). WIMAX permite amplias coberturas tanto con línea de visión entre los puntos a conectar (LOS) como sin línea de visión (NLOS) en bandas de frecuencias de uso común o licenciadas. [1]

En este trabajo monográfico se presenta el análisis de varios modelos de radiopropagación utilizados en el diseño de una interfaz radio WIMAX, todo ello mediante simulación en la herramienta computacional MATLAB. Además la eficiencia de la misma será medida a través de la aproximación de los valores de desempeño de los modelos de propagación elegidos para el análisis.

Además, se presentara el diseño de una GUI (Grafical User interface) en MATLAB, esta se desarrolló de forma interactiva con el comando GUIDE (GUI Development Environment) el cual provee herramientas y editores gráficos de forma flexible para su implementación.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>5</b>
<b>SISTEMA WiMAX.....</b>	<b>5</b>
1.1.1. Principales Características de WiMAX.....	6
1.1.2. Capa Física de WiMAX.....	9
1.1.3. Parámetros OFDM en WiMAX.....	10
1.1.4. Capa física WiMAX fijo (OFDM-PHY).....	10
1.1.5. Capa física WiMAX móvil (OFDMA-PHY).....	11
1.1.6. Símbolo OFDMA .....	14
1.1.7. Dominio del Tiempo .....	16
1.1.8. Dominio de la Frecuencia.....	16
1.1.9. Permutación Distribuida y Adyacente.....	17
1.1.10. SLOT OFDMA.....	18
1.1.11. PARAMETROS FÍSICOS DE OFDMA 802.16e FFT=1024.....	19
1.1.12. Modulación y codificación en WiMAX.....	20
1.1.13. Capa MAC de WiMAX.....	21
1.1.14. Mecanismos de Acceso al medio .....	23
1.1.15. Calidad de servicio (QoS) .....	24
1.1.16. Arquitectura de red WiMAX.....	28
1.1.17. Parámetros del sistema WiMAX móvil.....	32
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>33</b>
<b>MODELOS DE PROPAGACIÓN.....</b>	<b>33</b>
2.1.1. Clasificación de los modelos de propagación.....	34
2.1.2. Modelos empíricos .....	34
2.1.3. Modelos teóricos .....	34
2.1.4. Modelos semi-empíricos.....	35
2.1.5. Propagación con línea de vista (LOS).....	35
2.1.6. Propagación sin línea de vista (NLOS).....	36
2.1.7. Modelos de propagación para WiMAX.....	37
2.1.8. Modelo de propagación de espacio libre.....	38
2.1.9. Modelos de propagación SUI.....	38
2.1.10. Modelo Ericsson 9999.....	41

<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>42</b>
DESARROLLO DE LA GUI EN MATLAB .....	42
3.1.1. <i>Crear una GUI en MATLAB.....</i>	44
3.1.2. <i>Entrada/Salida de Datos de la GUI.....</i>	50
3.1.3. <i>GUI Finalizada .....</i>	54
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>55</b>
ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN .....	55
4.1.1. <i>Modelos de propagación SUI.....</i>	55
4.1.2. <i>Modelos de propagación Ericsson 9999 .....</i>	62
4.1.3. <i>Modelos de propagación de espacio libre .....</i>	69
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>71</b>
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	71
5.1.1. <i>Análisis de simulación en un área urbana.....</i>	71
5.1.2. <i>Análisis de simulación en un área sub-urbana.....</i>	72
5.1.3. <i>Análisis de simulación en un área rural .....</i>	73
5.1.4. <i>Guia de laboratorio .....</i>	73
LISTA DE FIGURAS.....	78
LISTA DE TABLAS .....	80
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	81
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>83</b>
CONCLUSIONES .....	83
RECOMENDACIONES.....	85
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>86</b>

## INTRODUCCIÓN

El acelerado avance de las tecnologías de comunicación inalámbricas ha suscitado en el cual una de las características de obligatorio cumplimiento en cualquier sistema embebido está ligada a su capacidad de comunicación inalámbrica. El aumento no solo de la capacidad de movilidad sino también el ancho de banda de transferencia de datos ha hecho posible el logro de conectividad en escenarios móviles. Para lograr este objetivo, un gran número de tecnologías, tanto propietarias como estandarizadas, han sido concebidas, una de estas la tecnología WiMAX se ve bastante prometedoras.

Los desarrollos tecnológicos de WiMAX actualmente implementados se basan en el estándar 802.16 el cual define las características de capa física y de acceso al medio, y van desde chipsets hasta radio bases y estaciones suscriptoras, las cuales constituyen lo que se conoce como ecosistema WiMAX como medio de conectividad inalámbrica para dispositivos móviles se ha hecho cada vez más posible en el capítulo 1 se abordara de manera más detallada dicha tecnología.

El presente trabajo hace un estudio de las pérdidas de propagación en tres tipos de terrenos, urbano, sub-urbano y rural, en dos tipos de frecuencia 2.3 GHz y 3.5 GHz las cuales son bandas licenciadas en las cuales opera WiMAX.

Para obtener valores de perdidas más exactos se implementara la utilización de tres modelos de propagación los cuales son los modelos SUI, modelo Ericsson 9999 y modelo de espacio libre (free Space). los cuales serán explicados con mayor detalle en el capítulo 2

Con la ayuda del programa computacional MATLAB se pretende desarrollar una interfaz gráfica (GUI) la cual se podrá apreciar todo su desarrollo tanto a nivel de código como grafico en el capítulo 3. la interfaz gráfica (GUI) servirá como una calculadora para graficar las curvas de pérdidas de propagación (pathloss), el usuario

podrá introducir distintos valores tales como frecuencia, alturas de la antena transmisora (Tx) y altura del dispositivo móvil (Rx).

En el capítulo 4 analizaremos en cada uno de los terrenos y a distintas frecuencias como es el comportamiento de los modelos de propagación en los ambientes antes mencionados.

En el capítulo 5 se analizarán los resultados arrojados por la interfaz gráfica (GUI), para determinar y analizar cuál de los modelos antes mencionados es el más apto para el tipo de terreno en que se esté implementando y se presentará la propuesta de una guía de laboratorio acerca de la GUI que se realizó.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

***Desarrollar una GUI con la herramienta computacional MATLAB™ para el análisis comparativo de modelos de propagación en un Sistema de Comunicaciones tipo WIMAX.***

### Objetivos Específicos

- ✚ Realizar un estudio de distintos modelos de propagación utilizados para la evaluación de pathloss en WIMAX.
- ✚ Analizar las posibilidades de utilización de los distintos modelos de propagación con sus diferentes tipos de terreno, en cuanto a sus complejidades de implementación y fiabilidad de resultados.
- ✚ Realizar un análisis de desempeño comparativo de los diferentes modelos de propagación utilizados para la evaluación de un sistema WIMAX, comparando sus resultados con los valores preestablecidos por el estándar.
- ✚ Diseñar una interfaz gráfica, que permita analizar el comportamiento o desempeño de parámetros funcionales de modelos de propagación para un sistema WIMAX, así también que sirva como una guía de laboratorio para estudiantes de la carrera.



## **JUSTIFICACIÓN**

La utilización de una herramienta computacional para analizar el desempeño de una red de telecomunicaciones, por ejemplo WIMAX, es de gran utilidad por cuanto permiten desarrollar con más precisión, menor costo y menor tiempo el análisis de los mismos, en nuestro caso particular, los entornos de radio propagación en sistemas de este tipo.

Mediante el desarrollo de esta monografía se pretende seguir explorando las posibilidades tecnológicas de las redes inalámbricas, ahora con los diferentes modelos de canales y herramientas computacionales tales como MATLAB y de esta manera desarrollar un prototipo de analizador que sirva como herramienta didáctica, dado su aporte pedagógico, repercutiendo en una mejor formación de los estudiantes en las asignaturas correspondiente a las telecomunicaciones, así como seguir consolidando esta área de investigación dentro del departamento de telecomunicaciones con nuevas experiencias cualitativas superiores en este ámbito.

Por ultimo esta monografía dará respuesta a la necesidad de seguir adquiriendo más experiencia en el análisis de desempeño de sistemas avanzados de comunicaciones, en este caso, se enfoca en la interfaz de radio para un sistema WIMAX y la forma de cómo implementar modelos de propagación en los mismo.

## **CAPÍTULO 1**

### **SISTEMA WiMAX**

WiMAX o Wireless Metropolitan Area Networking (WMAX), es un estándar desarrollado por el grupo IEEE 802.16 y adoptado por la IEEE y el grupo ETSI HIPERMAN. El grupo IEEE 802.16 fue formado en 1998 con el propósito de desarrollar el estándar de interfaz aire para la tecnología Wireless Broadband.[2]

El enfoque inicial del grupo fue el desarrollo de un sistema inalámbrico de línea de vista basado en punto-a-multipunto. El estándar resultante fue el 802.16 el cual está basado en single carrier Physical Layer (PHY) ó capa física de portadora con ráfagas (TDM) a nivel de capa MAC.

El grupo IEEE 802.16 subsecuentemente produjo la revisión 802.16a en la cual se añadió el soporte para aplicaciones NLOS ó Sin Línea de vista, utilizando orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) la que reemplazo las versiones anteriores y se constituyó como la solución básica para aplicaciones WiMAX. Estas primeras soluciones WiMAX basado en el estándar 802.16-2004 se centraban solo en WiMAX Fijo.

En diciembre de 2005 el grupo de la IEEE completó y aprobó un nuevo y mejorado estándar, el cual satisfacía la tendencia y necesidad de la movilidad, el IEEE 802.16e-2005, este es recomendado para aplicaciones WiMAX móviles.

El foro WiMAX ha preparado una serie de perfiles del sistema y perfiles de certificación. Un perfil de sistema define un subconjunto de características optimas obligatorias, para la capa física y la capa MAC, estas son seleccionadas por el foro WiMAX del estándar IEEE 802.16-2004 ó en su conjunto el estándar 802.16e-2005.



Actualmente, el foro WiMAX tiene dos perfiles de sistema: uno basado en IEEE 802.16-2004 OFDM PHY, llamado perfil de sistema Fijo, y el otro basado en IEEE802.16e-2005 OFDM PHY escalable, llamado perfil de sistema de Movilidad.

Un perfil de certificación, es decir, una representación particular de un perfil de sistema donde la frecuencia de operación, ancho de banda del canal, y modo de duplexación son también especificados.

Con el término del estándar IEEE802.16e-2005, los intereses dentro del grupo WiMAX ha cambiado hacia el desarrollo y certificación de perfiles de sistemas WiMAX móvil. Todos los perfiles móviles WiMAX usan OFDMA escalable como la capa física, y todos los actuales perfiles de certificación son basados en time division duplexing (TDD). TDD es a menudo la más preferida.

#### **1.1.1. Principales Características de WiMAX**

WiMAX es una solución inalámbrica de banda ancha que ofrece un conjunto de características con mucha flexibilidad en términos de opciones de implementación y ofertas potenciales de múltiples servicios. Algunas de las características más prominentes son destacadas a continuación:

-  *OFDM en PHY:* La capa física PHY está basada en OFDM, un esquema que ofrece buena resistencia al multitrayecto, y permite operar en condiciones NLOS (sin línea-de-vista).
  
-  *Muy Altos picos en tasa de datos:* WiMAX es capaz de soportar altos picos en tasas de datos, estos pueden ser tan altos como 70Mbps cuando se opera a 20MHz de espectro ancho. Típicamente usando 10MHz con esquema TDD puede alcanzar picos de 20Mbps y 6.7 para el enlace de bajada y subida. Estos picos son logrados usando modulación de 64QAM con una tasa de codificación de corrección de error de 5/6.

- ✚ *Ancho de Banda escalable y soporte de tasas de datos:* WiMAX tiene una arquitectura en la capa física escalable que permite que las tasas de datos escalen fácilmente con el ancho de banda disponible. Esta escalabilidad está soportada en modo OFDMA.
- ✚ *Modulación y codificación Adaptiva (AMC):* WiMAX soporta un número de modulación y envío de corrección de errores ó forward error correction (FEC) esquemas de codificación y permite que el esquema sea cambiado por usuario o por trama, basado en las condiciones de canal.
- ✚ *Retransmisión Link-Layer:* Para conexiones que requieren confiabilidad aumentada. WiMAX soporta peticiones de retransmisión automática ó automatic retransmitted request (ARQ) en la capa de enlace. Conexiones con-ARQ requieren acuse de recibo por el receptor, paquetes sin acuse de recibo son asumidos como perdidos y son retransmitidos. WiMAX soporta opcionalmente ARQ-Híbrido, este es híbrido entre FEC y ARQ.
- ✚ *Soporte TDD y FDD:* IEEE802.16-2004 y IEEE802.16e soportan ambos TDD y FDD, time division duplexing y frequency division duplexing, así como half-duplex FDD, el cual permite una implementación del sistema con bajos costos.
- ✚ TDD es preferido por sus ventajas:
  - Flexibilidad al escoger las tasas de datos en los enlaces de subida/bajada.[3]
  - Habilidad para explotar la reciprocidad del canal.[4]
  - Habilidad para implementarse en espectros sin par.[5]
  - Menor complejidad en el diseño del transceiver.[6]

Todos los perfiles iniciales en WiMAX están basados en TDD, excepto por dos perfiles fijos WiMAX a 3.5GHz.

- ✚ *Orthogonal frequency division multiple access (OFDMA):* WiMAX móvil usa OFDM como técnica de acceso múltiple, a través del cual diferentes usuarios son asignados con diferentes subconjuntos de tonos OFDM.

OFDM facilita la explotación con diversidad de frecuencia y diversidad de multiusuario, mejorando significativamente la capacidad del sistema.

- ✚ *Asignación dinámica y flexible de recursos por usuario*

El enlace de subida y bajada la asignación es controlada por un planificador en la estación base. La capacidad es compartida entre usuarios múltiples, con básica demanda, usando esquemas con ráfagas TDM. Cuando se usa en modo OFDMA PHY la multiplexación es realizada adicionalmente en dimensión de frecuencia, asignando diferentes portadoras OFDM subsecuentes a diferentes usuarios. Los recursos pueden ser asignados en el dominio del espacio así como usando sistemas opcionales de antenas avanzados ó AAS. El estándar permite que los recursos de ancho de banda sean asignados en tiempo, frecuencia y espacio y tener un mecanismo flexible para transmitir la información de los recursos asignados trama por trama.

- ✚ *Soporte avanzado para técnicas de antenas*

La solución WiMAX tiene un amplio número de incorporados dentro del diseño de la capa física. La cual permite el uso de múltiples técnicas de antenas. Como la formación de haz ó beamforming, codificación espacio-tiempo y multiplexación espacial. Estos esquemas pueden ser usados para aumentar la capacidad del sistema en su totalidad y la eficiencia espectral al implementar múltiples antenas en el transmisor o receptor.

- ✚ *Soporte para la calidad de servicio*

La capa MAC de WiMAX tiene una arquitectura orientada a la conexión para soportar una variedad de aplicaciones, incluyendo voz y servicios multimedia. El sistema

ofrece soporte constante de tasa de bit, tasa de bit variable, tiempo-real y flujos de tráfico sin tiempo real, adicionalmente tráficos de datos de mejor esfuerzo (best effort)

#### *Seguridad Robusta*

WiMAX soporta una fuerte encriptación, usando AES, advanced encryption standard, y tiene una privacidad robusta y administración de llaves de protocolo. El sistema también ofrece una arquitectura de autenticación flexible basado en EAP, extensible authentication protocol el cual permite variadas credenciales de usuario con nombres de usuario y contraseñas, certificados digitales y tarjetas inteligentes.

#### *Soporte para la movilidad*

Soporta seguros handovers sin interrupciones para aplicaciones de retraso-tolerante y movilidad completa como VoIP. El sistema tiene incorporado mecanismos de ahorro de energía que extienden la vida de la batería de los dispositivos de los usuarios. Mejoras en la capa física así como estimación de canal común, subcanalización en el enlace de subida, control de potencia.

#### *Arquitectura basada en IP*

WiMAX está basado en toda la plataforma IP. Todos los servicios end-to-end son entregados sobre arquitectura IP, dependiendo de protocolos basados en IP para el transporte de fin-a-fin, QoS, administración de sesión, seguridad y movilidad. La confianza en IP permite que WiMAX maneje el declinamiento de las de costo del procesamiento IP, facilite fácil convergencia con otras redes y aprovechar el rico ecosistema de desarrollo de aplicaciones que existe para IP.

### **1.1.2. Capa Física de WiMAX**

La capa física de WiMAX se basa en la multiplicación por división ortogonal en frecuencia (OFDM). OFDM es un esquema de transmisión que nos permite la transmisión de datos de alta velocidad, video y comunicaciones multimedia. Este esquema de transmisión es utilizado por muchos sistemas comerciales, tales como

DSL, WiFi, DVB-H. OFDM es un esquema eficiente para transmisión de elevadas tasas de datos en entornos sin visión directa y con distorsión de multitrayecto.

OFDM pertenece a una familia de esquemas de transmisión llamada modulación multiportadora, el cual se basa en la idea de dividir un determinado flujo de datos en varios flujos y modular cada flujo con portadoras distintas (llamadas subportadoras). Los esquemas de modulación multiportadora minimizan la interferencia intersímbolo (ISI) haciendo que la duración en el tiempo del símbolo transmitido sea lo suficiente larga como para que el retraso introducido por el canal sea una insignificante fracción de la duración del símbolo.

### **1.1.3. Parámetros OFDM en WiMAX**

Las versiones fijas y móviles de WiMAX tienen diferentes implementaciones de OFDM en la capa física PHY. Para WiMAX fijo, basado en la forma IEEE 802.16-2004, se usa una capa física basada en OFDM con una FFT de 256 subportadoras de tamaño. Para WiMAX móvil, basado en la norma 802.16e-2005, se usa capa física basada en OFDMA variable. En el caso de WiMAX móvil, el tamaño de la FFT puede variar desde 128 hasta 2048 subportadoras.

### **1.1.4. Capa física WiMAX fijo (OFDM-PHY)**

Para esta versión el tamaño de la transformada rápida de Fourier (FFT) está fijada en 256 subportadoras, de las cuales 192 son subportadoras para transportar datos, 8 son usadas como subportadoras piloto para propósitos relacionados con la estimación y la sincronización del canal, y el resto son usadas como subportadoras de la banda de guarda. Puesto que el tamaño de la FFT es fijo, el espacio entre subportadoras varía con el ancho de banda del canal. Cuando se utilizan grandes anchos de banda, el espacio entre subportadoras aumenta y el tiempo de símbolo disminuye. Que el tiempo de símbolo disminuya significa que será necesario asignar una mayor frecuencia de tiempo de guarda con el propósito de superar la difusión de retardos.

WiMAX permite gran cantidad de tiempos de guarda, por eso permite a los diseñadores del sistema realizar intercambios entre la eficiencia espectral y la robustez frente a la difusión de retardo. Para alcanzar la máxima robustez frente a la difusión de retardo, se puede usar un 25 por ciento de la banda de guarda.

#### **1.1.5. Capa física WiMAX móvil (OFDMA-PHY)**

El tamaño de la FFT puede variar entre 128 y 2048 subportadoras. En este caso cuando el ancho de banda aumenta, el tamaño de la FFT también se ve incrementando para que el espacio entre las subportadoras siempre sea 10.94 KHz, esto mantiene la duración del símbolo OFDM fijo y por tanto las capas superiores no se tienen que preocupar de esto. Un diseño escalable también mantiene los costos bajos. El espacio de 10.94 KHz fue elegido como un buen equilibrio para satisfacer el retardo de propagación y el efecto Doppler y así poder soportar un retardo de hasta 20 microsegundos y una movilidad de hasta 125 km por hora operando a 3.5 GHz. El espacio entre subportadoras de 10.94 KHz implica que se usen FFT de 128, 512, 1024 y 2048 bits cuando el ancho de banda del canal es 1.25MHz, 5MHz, 10MHz y 20 MHz respectivamente. Debería ser anotado, sin embargo, que WiMAX móvil puede incluir otros perfiles de ancho de banda adicionalmente. Por ejemplo, un perfil compatible con WiBro utilizara un canal de 8.75MHz de ancho de banda y una FFT de 1024 bits. Este perfil requerirá evidentemente un espacio entre subportadoras diferente y por tanto no tendrá las mismas propiedades de escala.

La siguiente tabla muestra los parámetros relativos a OFDM para ambas capas físicas, las basadas en OFDM y la basada en OFDMA. Los parámetros que se muestran en la tabla están limitados a un conjunto de perfiles que son posibles, pero no constituyen un conjunto exhaustivo de todos los posibles valores.

TABLA 1.1: PARÁMETROS PARA CAPAS FÍSICAS. [2]



Parámetros		WiMAX fijo OFDMA-PHY		WiMAX Móvil OFDMA-PHY	
Tamaño FFT	256	128	512	1024	2048
Numero de subportadoras de datos	192	72	360	720	1440
Numero de subportadoras piloto	8	12	60	120	240
Numero de subportadoras de guardia	56	44	92	184	368
Periodo de guardia			1/32, 1/16, 1/8, 1/4		
Tasa Muestreo			Depende del Ancho de banda: 7/6 para 256 OFDM, 8/7 para múltiplos de 1.75MHz y 28/25 para múltiplos de 1.25MHz, 1.5MHz, 2MHz o 2.75MHz.		
Ancho de banda del canal (MHz)	3.5	1.25	5	10	20
Espaciado Subportadoras (KHz)		15.625		10.94	
Tiempo útil de símbolo ( $\mu$ s)		64		91.4	
Tiempo de guardia (asumiendo 12.5%)		8		11.4	
Duración del símbolo OFDM ( $\mu$ s)		72		102.9	
Numero de símbolos OFDM en tramas de 5 ms		69		48	

En OFDMA se puede dividir las subportadoras disponibles en varios grupos llamados subcanales. WiMAX fijo basado en una capa física OFDM solamente permite una forma limitada de subcanalización en el enlace ascendente. El estándar define 16 subcanales, donde se puede asignar 1, 2, 4, 8, o todos los conjuntos a una estación de abonado en el enlace ascendente.

La subcanalización del enlace ascendente en WiMAX fijo permite a las estaciones de abonados transmitir utilizando solamente una fracción del ancho de banda que le

asigna la estación base, lo que proporciona mejoras económicas en el enlace que se pueden utilizar para aumentar el rendimiento y/o mejorar la duración de la batería de las estaciones de abonado. Un factor de subcanalización de 1/16 proporciona una mejora de 12 dB en el enlace.

Sin embargo, la versión móvil de WiMAX, cuya capa física está basada en OFDMA, permite subcanalizar tanto en el enlace ascendente como el descendente, y aquí los subcanales forman la unidad mínima de recursos de frecuencia asignados por la estación base.

Por lo tanto, se puede asignar subcanales diferentes a usuarios diferentes como un mecanismo de acceso múltiple. Este tipo de esquema de multiacceso se llama acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA) que da nombre a la capa física WiMAX móvil. Se pueden constituir subcanales utilizando subportadoras contiguas o subportadoras distribuidas pseudo-aleatoriamente en el espectro de frecuencia. Los subcanales formados utilizando subportadoras distribuidas proporcionan más diversidad frecuencial, o cual es especialmente útil para aplicaciones móviles.

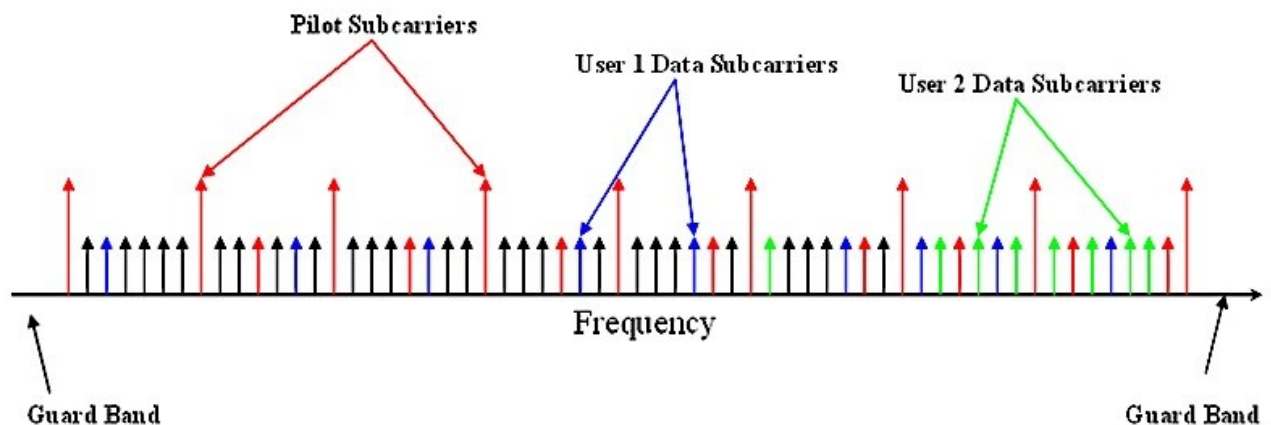


FIGURA 1.1: EFECTOS DE LA SUBCANALIZACIÓN. [2]

WiMAX define varios esquemas de subcanalización basados en portadoras distribuidas tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. Uno de

ellos llamados uso parcial de subportadoras (PUSC) es obligatorio para todas las implementaciones móviles de WiMAX. Los perfiles de WiMAX iniciales definen 15 y 17 subcanales para el enlace descendente y el enlace ascendente, respectivamente, para operaciones con el esquema PUSC y 5MHz de ancho de banda. Para operaciones de 10 MHz, se define 30 y 35 canales respectivamente. [7]

El esquema de subcanalización WiMAX basado en subportadoras contiguas se llama banda adaptiva de modulación y codificación (AMC). Aunque se pierde la diversidad frecuencial, la banda AMC permite diseñar el sistema para explotar la diversidad de usuarios, asignando los subcanales a los usuarios basándose en su respuesta frecuencial. La diversidad de multiusuarios puede proporcionar una ganancia significativa en toda la capacidad del sistema, si el sistema procura proporcionar a cada usuario un subcanal que maximice su relación señal a ruido más interferencias (SINR). En general, la subcanalización basada en subportadoras contiguas es más apropiada para aplicaciones fijas o con poca movilidad.

#### **1.1.6. Símbolo OFDMA**

El acceso múltiple se refiere a que durante en tiempo de duración de un símbolo las soportadoras se asignan a conexiones diferentes. Por lo tanto se necesita una representación tiempo-frecuencia para ubicar los recursos que se asignan a cada conexión. Las sub-portadoras se agrupan para formar lo que se denomina un subcanal. La cantidad de sub-portadoras que forman un sub-canal depende del número de puntos de la FFT, entre otros Sub-canales.

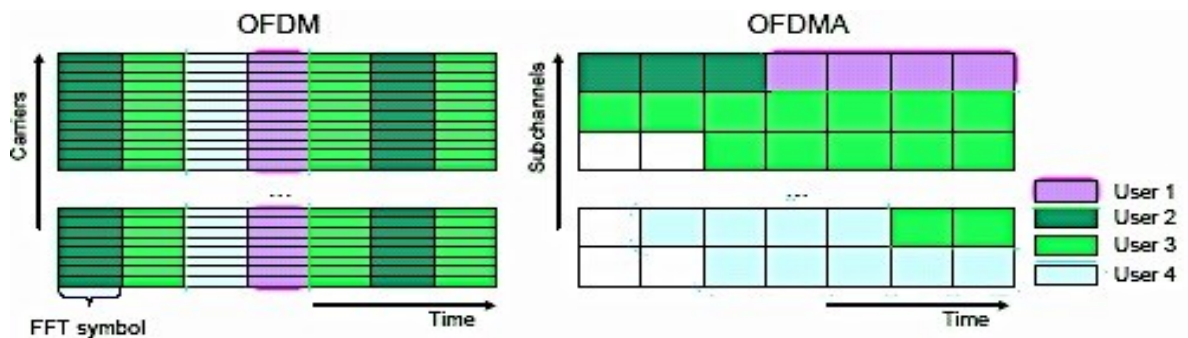


FIGURA 1.2: SUB-CANALIZACIÓN DE OFDM Y OFDMA. [2]

Ahora vemos que durante el tiempo de símbolos, el recurso frecuencia, o sea Subcanales, se asigna a conexiones o usuarios distintos. Entonces para ubicar un subcanal necesitamos un apuntador que nos indique el símbolo, es decir tiempo y el subcanal respectivo.

En OFDMA, el ancho de banda se divide en sub-canales lógicos con el fin de soportar escalabilidad, acceso múltiple y antenas inteligentes.

Un sub-canal es un conjunto de sub-portadoras físicas activas que pueden o no ser adyacentes. Es la menor estructura lógica que puede asignarse en el dominio de la frecuencia.

Los sub-canales se pueden asignar a usuarios distintos (Multiple Access).

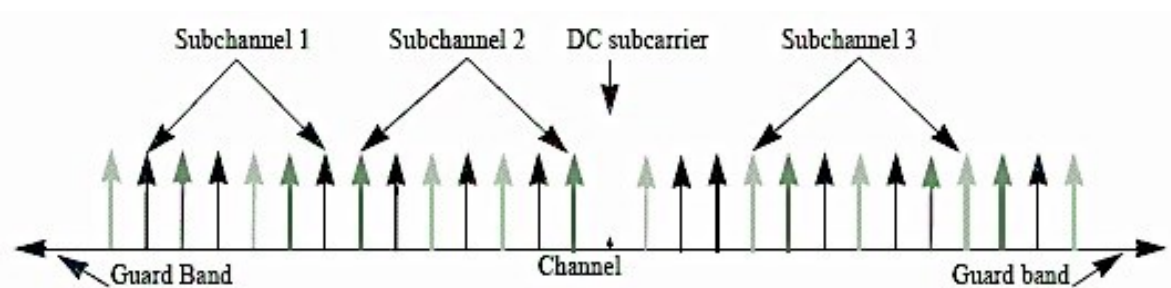


FIGURA 1.3: EJEMPLO DE TRES SUB-CANALES. [2]

### 1.1.7. Dominio del Tiempo

La forma de onda temporal es creada por medio de la IFFT. El tiempo de duración de la onda se conoce como tiempo útil de símbolo  $T_b$ . La última parte  $T_g$  del símbolo, denominada CP (Cyclic Prefix) se copia al inicio del mismo y se usa para recoger los multitrayectos mientras se mantiene la ortogonalidad.

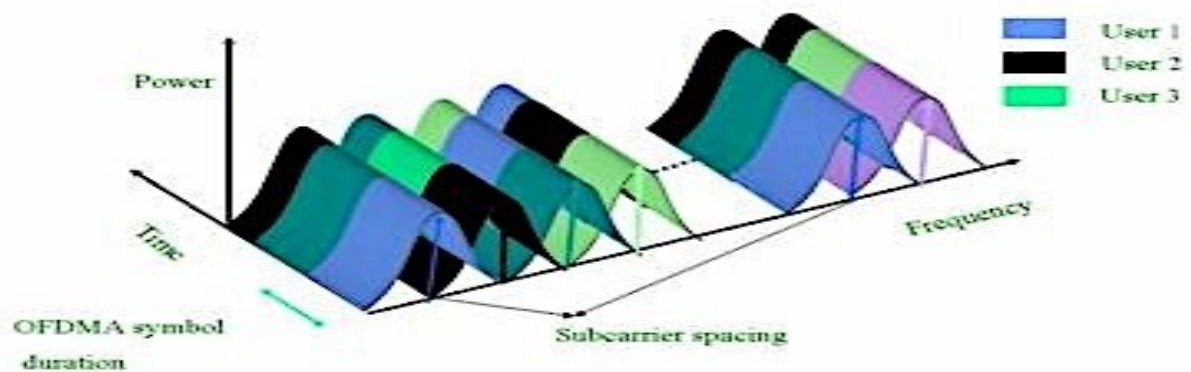


FIGURA 1.4: DOMINIO EN EL TIEMPO. [1]

Aquí presentamos nuevamente el concepto de prefijo cíclico. Su función es agrandar la duración del símbolo para reducir la ISI.

### 1.1.8. Dominio de la Frecuencia

#### *Representación de un Símbolo OFDM*

Un símbolo OFDM está compuesto de varias sub-portadoras, cuyo número determina el tamaño de la FFT utilizada.

Existen tres tipos de sub-portadoras

Sub-portadoras de datos: para transmisión de datos

– Sub-portadoras pilotos: para propósitos de estimación

– Sub-portadoras nulas: no existe transmisión, bandas de guarda, sub-portadoras no activas y sub-portadora DC.

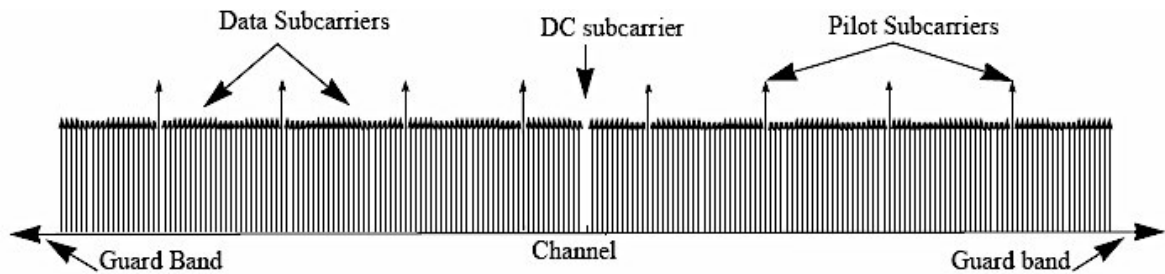


FIGURA 1.5: REPRESENTACIÓN DE UN SÍMBOLO OFDM. [4]

En el dominio de la frecuencia un símbolo se representa por todas las sub-portadoras que lo integra, sin importar el tipo de cada una de ellas.

#### 1.1.9. Permutación Distribuida y Adyacente

La asignación de sub-portadoras en cada modo se hace siguiendo ciertas reglas, con el fin de añadir diversidad de frecuencia y reducir las interferencias.

##### 1. Permutación distribuida

- ✚ Para aplicaciones móviles
- ✚ Minimiza la probabilidad de asignar la misma

##### 2. Sub-portadora en celdas o sectores adyacentes

- ✚ Se reduce la probabilidad de fast fading en móviles
- ✚ Menor ancho de banda pero más robustas
- ✚ Permutación adyacente
- ✚ Aplicaciones fijas, nómadas y baja movilidad
- ✚ Mayor ancho de banda

Las diferentes sub-portadoras deben agruparse para formar los sub-canales. Es necesario entonces definir un método para seleccionar las sub-portadoras que integrarán un sub-canal en particular, ese proceso es lo que se denomina permutación. Básicamente existen dos reglas. La permutación distribuida donde las sub-portadoras que integran un sub-canal no son adyacentes, sino que se escogen

por medio de un algoritmo que garantiza cierta diversidad en frecuencia, esta metodología es la recomendada para aplicaciones móviles. El otro método consiste en que las sub-portadoras de un sub-canal sean adyacentes entre sí, en este caso no hay diversidad en frecuencia pero el ancho de banda es mayor, típicamente para aplicaciones fijas o de baja movilidad.

#### 1.1.10. SLOT OFDMA

Para su completa definición requiere su ubicación en el tiempo (Símbolo OFDMA) y en la frecuencia (dimensión sub-canal). Es la unidad de datos más pequeña que se puede asignar. Depende de la estructura del símbolo OFDMA, el cual varía en función del UL y del DL, para FUSC y PUSC.

En la figura 1.4 tenemos una representación en dos dimensiones donde cada rectángulo representa un slot que puede asignarse a una conexión diferente, o varios slots también se pueden destinar a una sola conexión o usuario.

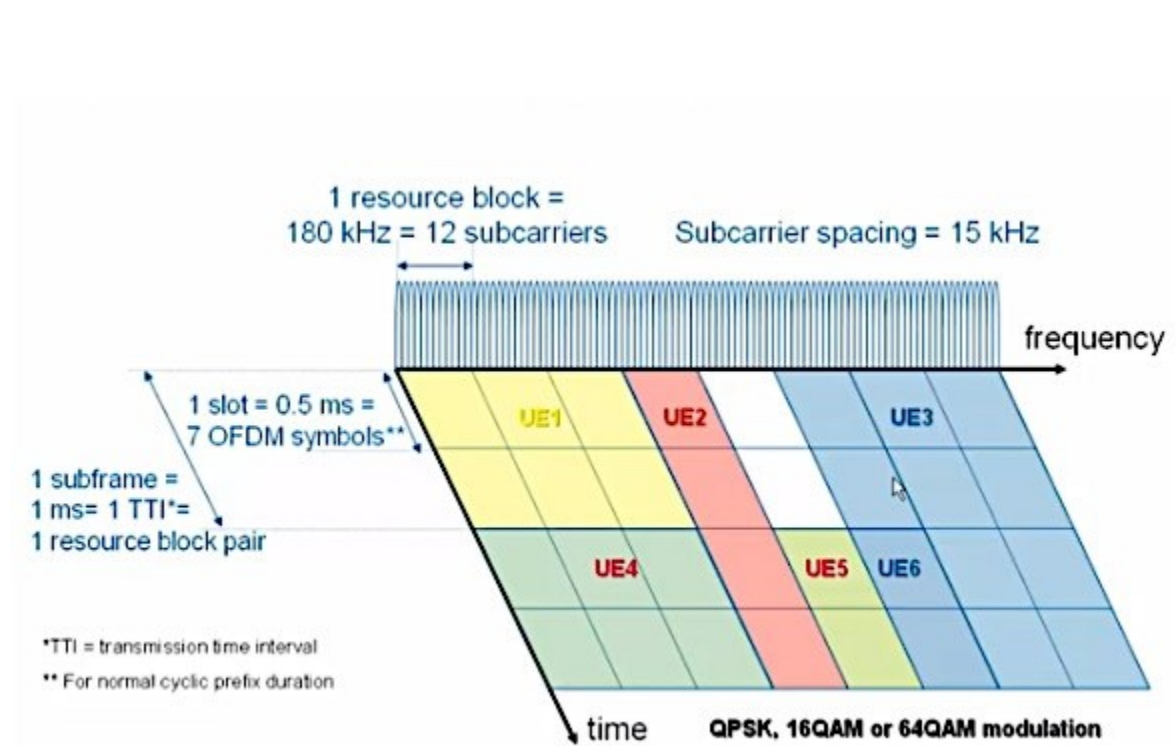


FIGURA 1.6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE OFDMA TIEMPO/FRECUENCIA. [3]

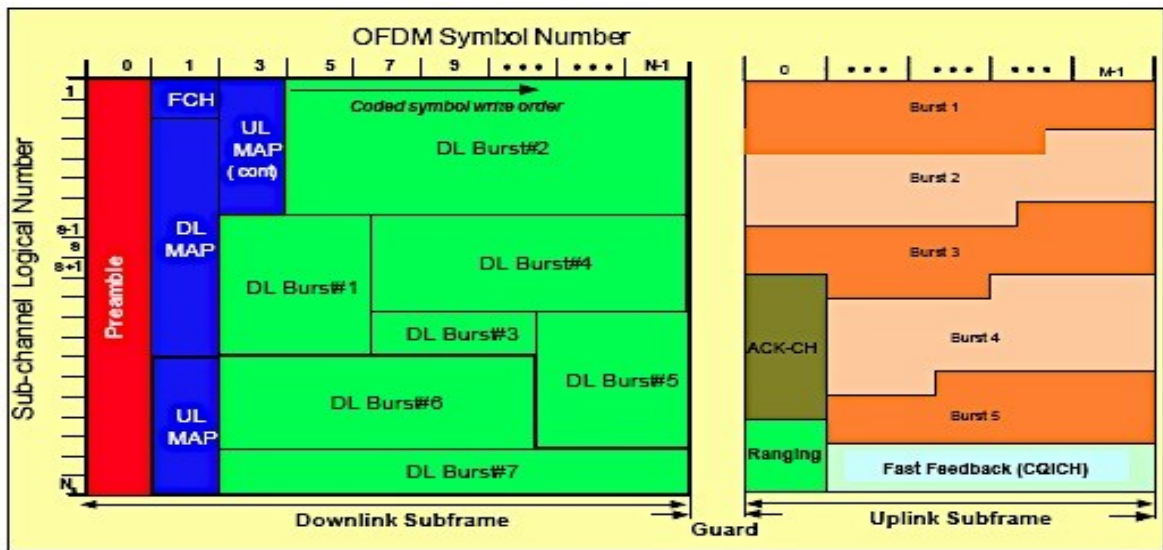


FIGURA 1.7: TRAMA OFDMA PARA TDD. [3]

Ahora la asignación de recursos produce un mapa más complicado y la capa MAC tiene que realizar procesos más inteligentes de manera que se usen de forma óptima los recursos.

En el DL todos los sub-canales se asigna durante el primer TS para enviar el preámbulo. Luego aparecen los mensajes de gestión y finalmente las asignaciones para conexiones de transporte de los diferentes usuarios. Un proceso similar se realiza en el UL, donde se reserva una cierta cantidad de recursos para el Ranging.

#### 1.1.11. PARAMETROS FÍSICOS DE OFDMA 802.16e FFT=1024

- ✚ Banda de frecuencia 2-11 GHz.
- ✚ Diseñada para operación NLOS.
- ✚ FFT de 1024.
- ✚ Scrambling.
- ✚ Códigos Convolucionales.
- ✚ Block turbo coding (opcional).
- ✚ Convolutional turbo coding (opcional).



- ✚ Block Interleaving.
- ✚ QPSK, 16QAM, 64QAM.
- ✚ Preámbulos diferentes para DL y UL.

Como ya se mencionó, esta capa física soporta FFT de varios valores. Como un ejemplo analizaremos la que corresponde a 2048 puntos. Las restantes son muy similares, por supuesto, con las diferentes derivadas del hecho de que la FFT tiene cantidad de puntos diferentes.

### 1.1.12. Modulación y codificación en WiMAX

WiMAX soporta una variedad de esquemas de modulación y codificación que permite que el esquema cambie en cada ráfaga básica, dependiendo de las condiciones del canal. La estación base puede medir la calidad del enlace ascendente y descendente de cada usuario, y así asignarle una modulación y una codificación que maximice la tasa de transferencia para la proporción señal/ruido disponible.[7]

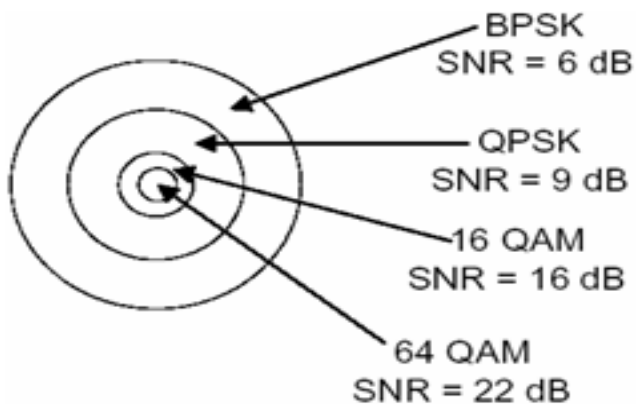


FIGURA 1.8: MODULACIÓN ADAPTIVA AL SNR. [6]

Por lo tanto la modulación y codificación adaptativa incrementan significativamente la capacidad de todo el sistema, y permite la comprensión en tiempo real entre la tasa de transferencia y la robustez de cada enlace. La siguiente tabla muestra una lista de varios esquemas de modulación y codificación soportados en WiMAX. En el enlace descendente las modulaciones QPSK, 16QAM y 64QAM son obligatorios para

WiMAX fijo y móvil; mientras que en el enlace 64QAM es opcional. La codificación FEC es obligatoria si usamos códigos convolucionales. Un total de 52 combinaciones de esquemas de modulación y codificación están definidas en WiMAX.

TABLA 1.2: MODULACIONES Y CODIFICACIONES EN WiMAX. [9]

	Downlink	Uplink
Modulación	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM; BPSK opcional para OFDMA-PHY.	BPSK, QPSK, 16QAM; 64QAM opcional.
Codificación	Obligatorio: códigos convolucionales de tasas $\frac{1}{2}$ , $\frac{2}{3}$ , $\frac{3}{4}$ , $\frac{5}{6}$ .  Opcional: Turbo códigos Convolucionales de tasas $\frac{1}{2}$ , $\frac{2}{3}$ , $\frac{3}{4}$ , $\frac{5}{6}$ ; códigos de repetición de tasas $\frac{1}{2}$ , $\frac{2}{3}$ , $\frac{1}{6}$ . LDPC, códigos RS para OFDMA-PHY.	Obligatorio: códigos convolucionales de tasas $\frac{1}{2}$ , $\frac{2}{3}$ , $\frac{3}{4}$ , $\frac{5}{6}$ .  Opcional: Turbo códigos Convolucionales de tasas $\frac{1}{2}$ , $\frac{2}{3}$ , $\frac{3}{4}$ , $\frac{5}{5}$ para códigos de repetición de tasa $\frac{1}{2}$ , $\frac{1}{3}$ . LDPC.

### 1.1.13. Capa MAC de WiMAX

La principal tarea de la capa MAC de WiMAX es la de proporcionar una interfaz entre la capa de transporte y la capa física. La capa MAC toma los paquetes de la capa inmediatamente superior, estos paquetes se llaman MAC Services Data Units (MSDUs), y los organizan dentro de los paquetes denominados MAC protocol Data Units (MPDUs) para transmitirlos por el aire. Para la recepción la capa MAC hace lo mismo pero en orden inverso. [8]

Esta es la otra capa característica del protocolo IEEE 802.16, fue diseñada para accesos a las aplicaciones PMP (punto a multipunto) de banda ancha de muy alta tasa de datos y con una variedad de requisitos de calidad de servicios (QOS), por lo que está orientado a conexión.

Permite que el mismo terminal sea compartido por múltiples usuarios. Lo que hace flexible a este sistema es que maneja algoritmos que permiten que cientos de usuarios finales puedan tener distintos requisitos de ancho de banda y de retardo.

Esta capa también se encarga de manejar la necesidad de tener una tasa de bits alta, tanto para el enlace ascendente (hacia la BS) como para el enlace descendente (desde la BS).

El sistema ha sido diseñado para incluir multiplicación por división del tiempo de voz y datos, protocolos de internet (IP), y voz sobre IP (VOIP).

El protocolo IEEE 802.16, debe soportar los variados requisitos de conectividad, como el modo de transferencia asíncrono (ATM) y protocolos basados en paquetes.

La capa MAC que es la encargada de coordinar el acceso al medio está compuesta de 3 subcapas:

1. **Subcapa MAC de convergencia (CS):** Es la encargada de adaptar las unidades de datos de protocolos de alto nivel al formato MAC SDU y viceversa. Es decir se encarga de transformar los datos de las redes externas y pasarlos a la subcapa MAC común convertidos en unidades de datos del servicio o SDU (Service Data Units), que son las unidades de datos que se transfieren entre capas adyacentes. Se encuentran sobre la subcapa MAC común y utiliza los servicios proveídos por esta. También se encarga de clasificar las SDUs de la MAC entrantes a las conexiones a las que pertenece.
2. **Subcapa MAC común (MAC CPS):** Es el núcleo de toda la capa MAC, provee los servicios de acceso al sistema, asignación de ancho de banda, establecimiento y mantenimiento de la conexión y se establecen las unidades de datos de protocolo o PDU (Protocol Data Units). También se encarga de hacer el intercambio de la unidad de servicios de datos de la capa MAC (SDU) con la capa de convergencia. Esta subcapa se encuentra fuertemente ligada con la capa de seguridad. En esta subcapa se presentan los servicios de planificación que representan los mecanismos de manipulación de datos soportados por el

planificador de la MAC para el transporte de datos en una conexión, cada una de las cuales está asociada a un solo servicio de datos el cual a su vez, está asociado a unos parámetros de QoS que son quienes determinan su comportamiento. Existen cuatro tipos de servicios:

- ✚ Concesión no solicitada (UGS)
- ✚ Polling en tiempo real (rtPS)
- ✚ Polling no en tiempo real (nrtPS)
- ✚ Mejor esfuerzo (BE)

**3. Subcapa MAC de seguridad:** Presta los servicios de autenticación, intercambio seguro de claves y cifrado. Permite proveer a los usuarios un servicio de banda ancha seguro a través de su conexión fija mediante el cifrado de las conexiones, y al operador protegerse contra las conexiones no autorizadas forzando el cifrado. La subcapa de seguridad es la encargada de la autenticación, establecimiento de claves y encriptación. Es en el a donde se realiza el intercambio de las PDUs de la MAC con la capa física.

#### **1.1.14. Mecanismos de Acceso al medio**

En WiMAX, la capa MAC en la estación base es completamente responsable de asignar un ancho de banda a todos los usuarios tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. La única vez en que la estación móvil tiene algún control sobre la asignación de ancho de banda es cuando tiene sesiones o conexiones múltiples con la estación base. En este caso, la estación base asigna un ancho de banda a la estación móvil en conjunto, y depende de esta ultima el repartirlo entre las conexiones múltiples que tiene. La estación base hace toda la demás planificación en el enlace ascendente y el descendente. Para el enlace descendente, la estación base puede asignar un ancho de banda a cada estación móvil, basado en las necesidades del trafico entrante, sin implicar a la estación móvil. Sin embargo, para el enlace ascendente las asignaciones deben estar basadas en peticiones de la estación móvil.

El estándar WiMAX contiene varios mecanismos por los que una estación móvil puede solicitar y obtener ancho de banda en el enlace ascendente. Según los parámetros de QoS y tráfico particulares asociados con un servicio, la estación móvil puede utilizar uno o más de estos mecanismos. La estación base asigna recursos dedicados o compartidos periódicamente a cada estación móvil, que puede utilizar para solicitar un ancho de banda. A este proceso se le llama Polling o sondeo. Se puede hacer sondeo tanto individualmente (unicast) como en grupos (multicast). Se hace sondeo multicast cuando hay un ancho de banda insuficiente para sondear cada estación móvil individualmente. Cuando se haga sondeo multicast, la ranura asignada para hacer peticiones de ancho de banda es una ranura compartida, la cual cada estación móvil sondeada intenta usar. Por ello WiMAX define un acceso por contienda y un mecanismo de resolución para cuando más de una estación móvil intente utilizar la ranura compartida. Si ya tiene una asignación para el tráfico a enviar, la estación móvil no se sondea.

En su lugar se permite que solicite más ancho de banda mediante tres métodos: el primero es transmitiendo una petición de ancho de banda autónomo MPDU, el segundo método es enviando una petición de ancho de banda por el canal de extensión, o por último mediante la utilización de forma fraudulenta de un ancho de banda solicitado en paquetes MAC genéricos.

#### **1.1.15. Calidad de servicio (QoS)**

Una de las partes fundamentales en el diseño de la capa MAC es la QoS. Algunas de las ideas para el diseño de las técnicas de QoS en WiMAX se sacan del estándar del cable modem DOCSIS, consiguiendo un fuerte control de la QoS utilizando una arquitectura MAC orientada a conexión en la que la estación base controla todas las conexiones del enlace descendiente y el ascendente. Antes de que ocurra cualquier transmisión de datos, la estación base y la estación móvil establece un enlace unidireccional entre las dos capas MAC llamado conexión. [2]

Cada conexión se identifica mediante un identificador de conexión (CID), que sirve como una dirección temporal para transmisiones de datos sobre el enlace particular. Además de conexiones para transmisión de datos de usuarios, la capa MAC de WiMAX define tres conexiones administrativas: las conexiones básicas, las primarias y las secundarias. WiMAX también define un concepto de flujo de servicio que es un flujo unidireccional de paquetes con un conjunto particular de parámetro de QoS e identificado por un identificador de flujo de servicio (SFID), los parámetros de QoS podrían incluir prioridad de tráfico, tasa de tráfico máximo sostenido, tasa máxima de ráfaga, tasa mínima tolerable, tipo de planificación, tipo de ARQ, retraso máximo, jitter tolerable, tamaño y tipo de unidad de datos, mecanismo a usar para la petición de ancho de banda, reglas para la formación de PDU, etc.

El flujo de servicio debe ser provisionado por un sistema de administración de red o creado dinámicamente a través de mecanismos de señalización definidos en el estándar. La estación base es responsable de distribuir el SFID y mapearlo a un único CID. Los flujos de servicio de MPLS (Multiprotocol Label Switching) para permitir QoS extremo a extremo basado en IP. Para soportar una amplia variedad de aplicaciones, WiMAX define cinco servicios:

**1. Servicio garantizado no solicitado o UGS (Unsolicited Grant Service):**

Es un servicio diseñado para soportar un tamaño fijo de paquetes a una tasa constante de datos, está orientado a servicios con requisitos estrictos de temporización como son la voz sobre IP (VoIP) sin supresión de silencios y la emulación de T1/E1. Los parámetros de flujo de servicio obligatorios que se definen en este servicio son la tasa máxima de tráfico sostenible, la máxima latencia permitida, el jitter tolerado y la política de petición/transmisión. Aquí la estación base programa periódicamente regiones de transmisión de manera regular, de manera anticipada y del tamaño negociado con anterioridad, durante el establecimiento de la conexión, sin que haya una petición explícita de parte del usuario con requisitos estrictos de temporización.


2. **Servicios de consulta en tiempo real o RtPS (Real-time Polling Service):** Este servicio está orientado al tráfico en tiempo real con tasa de transmisión variable, como el video MPEG. Los parámetros de flujo de servicio obligatorios que se definen en este servicio son la tasa mínima reservada, la máxima tasa de tráfico sostenible, con tráfico RtPS se les asigna periódicamente una oportunidad de transmisión para solicitar ancho de banda de manera periódica con el fin de satisfacer sus requisitos en tiempo real.
3. **Servicio de consulta o NRtPS (Non-Real-time Polling Service):** Servicio diseñado para soportar flujos de datos tolerantes a retardados y de tamaño variable pero con un ancho de banda mínimo requerido, tal como FTP. Los parámetros obligatorios de flujo de servicio que se definen en este servicio son la tasa mínima de tráfico reservada, la tasa máxima de tráfico sostenible, la prioridad de tráfico y la política petición/transmisión.
4. **Servicio de mejor esfuerzo o BE (Best Effort Service):** En este servicio no se garantiza un nivel mínimo de servicio, ni retardo, ni caudal. Es decir este servicio está diseñado para aplicaciones sin requisitos mínimos de ancho de banda. Los parámetros obligatorios de servicio de flujo definido en este servicio son la máxima tasa de tráfico sostenible, la prioridad de tráfico y la política de petición/transmisión.
5. **Servicio extendido en tiempo real y tasa variable o ERT-VR (Extended Real-Time Variable Rate Service):** Se diseña este servicio para aplicaciones como VoIP con supresión de silencio, es decir con detección de actividad ya que tiene tasa de datos y un retraso garantizado. Este servicio solamente está definido en el estándar IEEE 802.16E-2005 y no en el 802.16-2004. Los parámetros obligatorios son la tasa mínima

reservada, la máxima latencia soportada, el jitter tolerable, la prioridad de tráfico y la máxima tasa de datos sostenible.

TABLA 1.3: TIPO QoS. [7]

Tipo de QoS	Parámetros QoS definidos	Ejemplo de aplicaciones
UGS-Unsolicited Grant Service	Máxima tasa sostenible Máxima latencia tolerada Tolerancia jitter	Voz sobre IP sin supresión de silencio
RtPS-Real time Polling Service	Mínima tasa reservada Máxima tasa sostenible Máxima latencia tolerada Prioridad de trafico	Flujo de audio y video
NRtPS-Non Real Time Polling Service	Mínima tasa reservada Máxima tasa sostenible Prioridad de trafico	Protocolo de transferencia de ficheros (FTP)
BE-Best Effort Service	Máxima tasa sostenible Prioridad de trafico	Navegación web, transferencia de datos
ErtVR- Extended Real Time Variable Rate Service	Mínima tasa reservada Máxima tasa sostenible Máxima latencia tolerada Tolerancia jitter Prioridad de trafico	VoIP con supresión de silencio

Aunque no se defina el planificador, WiMAX define varios parámetros y características que facilitan la implementación de un planificador efectivo:

-  Soporte para una definición paramétrica detallada de requisitos de QoS y una variedad de mecanismos para señalar eficazmente el tráfico y los requisitos de QoS detallados en el enlace de subida.



- ✚ Soporte para asignación de recurso dinámica tridimensional en la capa MAC. Los recursos pueden ser asignados en tiempo (time slots), en frecuencia (subportadoras), y en espacio (antenas múltiples).
- ✚ Soporte de información de reacción rápida sobre la calidad del canal para permitir que el planificador seleccione la codificación y modulación apropiadas para cada asignación.
- ✚ Soporte permutaciones entre subportadoras contiguas, tal como AMC, que permiten al planificador explotar la diversidad de multiusuario asignado correspondientemente a cada abonado su subcanal más fuerte.

#### **1.1.16. Arquitectura de red WiMAX**

El estándar IEEE 802.16e-2005 nos proporciona la interfaz aire para WiMAX pero no nos define la estructura de la red de un extremo a otro. El grupo de trabajo del foro WiMAX es el responsable de desarrollar los requisitos de la estructura de la red, su arquitectura y los protocolos para WiMAX, usando el estándar 802.16e-2005 como interfaz aire.

Este grupo de trabajo ha desarrollado un modelo de referencia de la red para el despliegue de estructuras de red WiMAX y para asegurar la máxima flexibilidad y la interoperabilidad entre varios equipos y operadores de WiMAX. Este modelo de referencia provee una arquitectura unificada de la red para soportar despliegues fijos, nómadas y móviles y un modelo de servicio basado en IP. En la figura 1.9 vemos una ilustración de lo que sería una red WiMAX basada en IP.

El modelo de referencia de una red WiMAX está compuesto principalmente por tres componentes interconectadas mediante interfaces estandarizadas o puntos de referencia del R1 a R5. Los tres componentes son:

1. MS: Mobile Station, usado en el extremo de la red del usuario para acceder a la red.
2. ASN: Access Service Network, comprende una o más estaciones bases y una o más pasarelas ASN para formar la red de acceso radio.
3. CSN: Connectivity Service Network, que provee conectividad IP con las funciones IP del núcleo de la red.

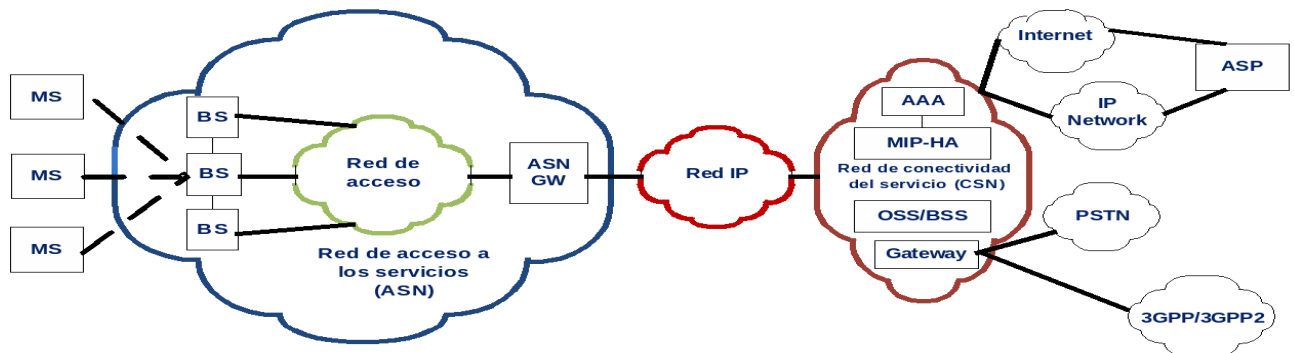


FIGURA 1.9: ESTRUCTURA DE RED BASADA EN IP. [3]

El modelo de arquitectura de red desarrollado por el grupo de trabajo de WiMAX fórum define una serie de entidades funcionales e interfaces entre dichas entidades (definidos como puntos de referencia).

1. **Estación Base (BS):** Implementa la capa física y MAC tal como se define en el estándar IEEE 802.16. En una red de acceso WiMAX, una BS está definida por un sector y una frecuencia asignada. En el caso de la asignación multifrecuencia de un sector, dicho sector incluye tantas BS como frecuencias asignadas haya. La conectividad a múltiples ASN-GW debe ser requerida en el caso de carga balanceada o propósitos de redundancia.
2. **Pasarela de Acceso al Servicio (ASN-GW):** Una pasarela ASN es una entidad lógica que actúa típicamente como un punto de agregación de tráfico de la capa de enlace dentro del ASN e incluye: funciones de control entre entidades pares y encaminando plano de portadora o funciones de fuente.

Una entrada completamente redundante de la red del servicio de acceso (ASN-GW) conecta las estaciones bajas de WiMAX con la red de la base. Con una capacidad de hasta 256 BS por unidad, el ASN-GW puede manejar las conexiones de más de 288,000 suscriptores, con 8,000 de los activos simultáneamente. Las funciones principales del ASN-GW son: gestión y paginación de la localización dentro del ASN, gestión de los recursos de radio, claves de encriptación, funcionalidad del cliente de AAA, establecimiento y gestión de la movilidad con las estaciones base, aplicaciones de QoS, funcionalidad de agente externo para Mobile IP y envió a los CSN seleccionados.

3. **Servicio de Conexión a la red (CSN):** El CSN consiste en unas funciones y equipos que permiten la conectividad IP a los suscriptores WiMAX. Por ello, el CSN incluye las siguientes funciones:

- ✚ Autorización de conexión de usuario en la capa de acceso 3.
- ✚ Administración de la QoS.
- ✚ Soporte de movilidad basado en Mobile IP.
- ✚ Tunelado (basado en protocolos IP) con otros equipos o redes.
- ✚ Facturación de los suscriptores WiMAX.
- ✚ Servicios WiMAX (acceso a internet, servicios de localización, conexión de servicios peer-to-peer, aprovisionamiento, autorización y/o conexión a gestores de bases de datos o IMS).

Además de las entidades anteriores, el grupo de trabajo del WiMAX fórum define varios puntos de referencia entre las distintas entidades que componen la arquitectura de esta red. Esos puntos de referencia logran puntos de interoperabilidad entre equipos de diferentes fabricantes. Hay seis puntos de referencia obligatorios (del R1 al R6) y dos opcionales (R7 y R8).

- ✚ **R1:** Punto de referencia de la interfaz radio entre el MS y el ASN. Incluye todas las características físicas y MAC de los perfiles de WiMAX. Lleva tráfico de usuario y mensaje de control de usuario.
- ✚ **R2:** Es la interfaz lógica entre el MS y el CSN. Contiene los protocolos y otros procedimientos implicados en la autenticación, servicios de autorización y administración de la configuración IP.
- ✚ **R3:** Es la interfaz lógica entre el ASN y el CSN. Transporta mensajes del plano de control e información del plano de datos a través de un tunelado entre el ASn y CSN.
- ✚ **R4:** Punto de referencia que interconecta dos ASNs (ASN perfil B) o dos ASN-GW (ASN perfil A o C). Transporta mensajes del plano de control y de datos, especialmente durante el transporte de un usuario WiMAX entre ASns/ASN-GWs. Presenta interoperabilidad entre ASNs de diferentes fabricantes.
- ✚ **R5:** Punto de referencia que interconecta dos CSNs. Consiste en el juego de métodos del plano de control y de datos para la comunicación entre CSN del NSP visitante y el NSP.
- ✚ **R6:** Es específico de alguno de los perfiles de ASN. En aquellos en los que el ASN se subdivide en BS y ASN-GW que corresponden con los perfiles A y C. Por tanto, este punto de referencia no es aplicable al perfil B. R6 se encarga de unir el BS y el ASN-GW. Transporta mensajes del plano de control y de datos.
- ✚ **R7 y R8:** Es una interfaz lógica opcional entre funciones de decisión y aplicación en el ASN-GW. R8 es una interfaz lógica entre estaciones base y transporta flujo de intercambio del plano de control que sirve para permitir un rápido y eficiente traspaso entre estaciones base.

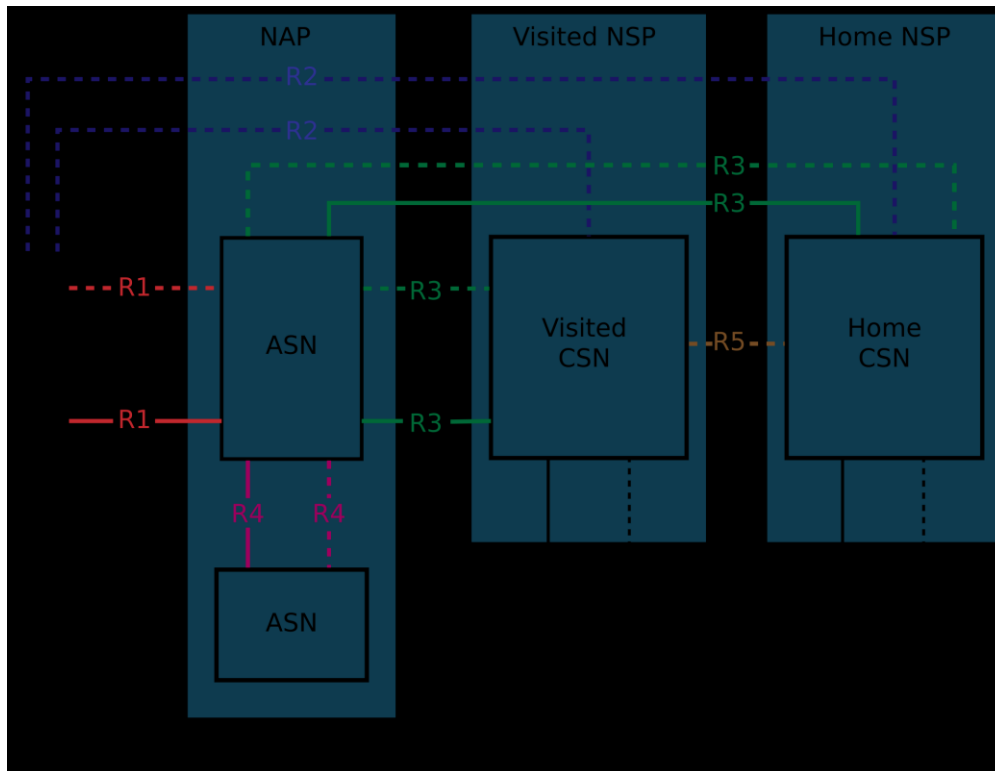


FIGURA 1.10: PUNTO DE REFERENCIA POR EL WiMAX FÓRUM. [9]

### 1.1.17. Parámetros del sistema WiMAX móvil

WiMAX está basado en OFDMA escalable, y puede ser configurado para operar en diferentes anchos de banda ajustando los parámetros del sistema. Consideramos un sistema WiMAX con las siguientes características como caso de estudio para la evaluación cuantitativa del desempeño de un sistema WiMAX. En la siguiente tabla se proveen los parámetros del sistema.<sup>1</sup>

En esta tesis nos limitamos a usar los parámetros recomendados por el foro WiMAX, para propósitos comparativos se tomaron los parámetros de altura de antena transmisora, altura del dispositivo móvil, frecuencia y la distancia a 4Km.

TABLA 1.4: PARÁMETROS DE SISTEMA WiMAX MÓVIL [5]

Parámetros	Valor
------------	-------

<sup>1</sup> Información más extensa sobre parámetros del sistema WiMAX, ver referencia [5]

Numero de 3-celdas sector	19
Frecuencia de Operación	2500MHz
Dúplex	TDD
Ancho de banda de canal	10MHz
Bs to Bs distancia	2.8 Km
Ms to Bs distancia mínima	36 m
Altura de antena	32 m
Altura del terminal móvil	1.5 m

## **CAPÍTULO 2**

### **MODELOS DE PROPAGACIÓN**

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características de radio de un ambiente dado, y es utilizado para predecir lo que sucederá con la señal transmitida entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx).

Un modelo de propagación como conjunto de formulaciones matemáticas empíricas o estadísticos utilizado para el diseño de la interfaz radio de cualquier sistema de radiocomunicaciones, permite al final obtener las pérdidas de las señales en el entorno de comunicaciones [10], así como, determinar cuál o cuáles serían las técnicas más efectivas que permitan posteriormente el despliegue de una red en una zona cualquiera.

#### **2.1.1. Clasificación de los modelos de propagación**

Los modelos de propagación generalmente se clasifican en los siguientes tipos: empíricos o estadísticos, teóricos o deterministas y una combinación de estos dos llamados semi-empíricos.

#### **2.1.2. Modelos empíricos**

Este tipo de modelos trabajan con la extrapolación estadística de resultados a partir de mediciones previamente realizadas sobre el terreno. Se desarrollan en base a mediciones realizadas en laboratorio o con modelos a escala de los ambientes de propagación. La principal ventaja de los modelos empíricos es que manejan de forma implícita todos los factores de propagación que influyen en el entorno. Su precisión depende de la exactitud de sus medidas y de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas las medidas y el entorno a analizar.

#### **2.1.3. Modelos teóricos**

Predicen en base a los principios fundamentales del medio que se desea modelar, por ejemplo los principios de la física si se modelan fenómenos físicos. La precisión en los cálculos es su principal ventaja. Para utilizar estos modelos se requieren grandes bases de datos con las características del entorno a estudiar, información que generalmente es difícil de obtener. Maneja algoritmos complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se limita a pequeñas áreas.[10]

#### 2.1.4. Modelos semi-empíricos

Los resultados que estos modelos generan tienen distribución de probabilidad. Combinan leyes físicas del fenómeno a modelar y factores de corrección empíricos que adaptan el modelo al entorno en el que desea trabajar. La figura 2.1 explica gráficamente la clasificación de los modelos de propagación.

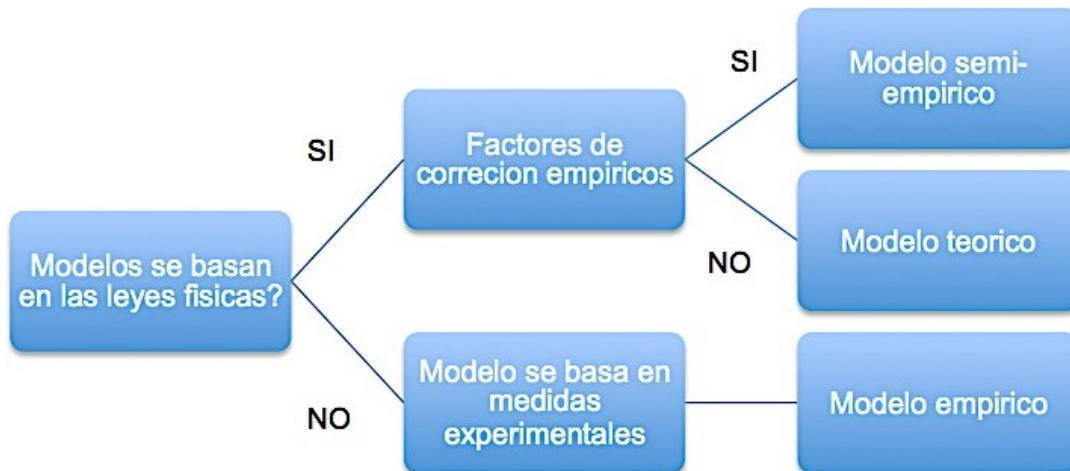


FIGURA 2.1: CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN.[2]

#### 2.1.5. Propagación con línea de vista (LOS)

En los enlaces con línea de vista (LOS) la onda electromagnética viaja directamente sin obstrucciones entre la estación transmisora y el receptor. Un enlace en estas condiciones de demanda que la mayor parte de la primera zona de Fresnel 60% este libre de obstáculos, en caso de no cumplir con esta condición la intensidad de la señal presentara una reducción significativa.

La zona de despeje de Fresnel que se requiere para establecer un enlace depende de la distancia entre el transmisor y receptor y de la frecuencia de operación. Para delimitar la zona de Fresnel, debemos determinar la línea de vista de radio frecuencia (RF LOS), la cual es un segmento de cada recta entre las antenas transmisoras y receptoras.



La zona que rodea el RF LOS se denomina zona de Fresnel. El radio de la sección transversal  $r$  de la primera zona de Fresnel tiene su máximo valor en el centro del enlace, como se observa en la figura 2.2.

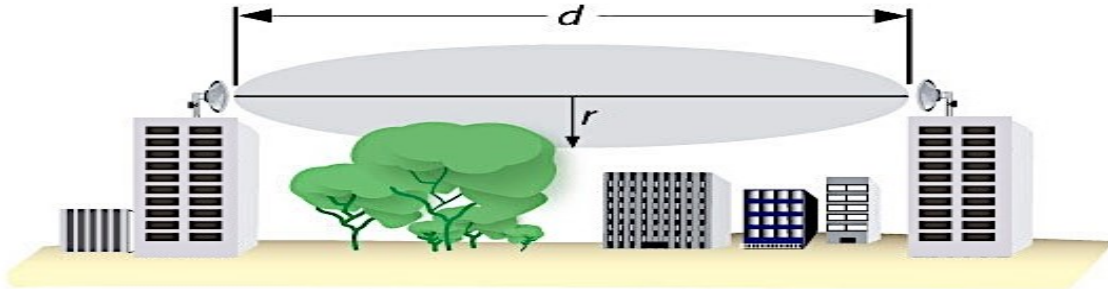


FIGURA 2.2: ENLACE CON LÍNEA DE VISTA / ZONA DE FRESNEL.[4]

#### 2.1.6. Propagación sin línea de vista (NLOS)

Como se observa en la figura 2.2, cuando existe un enlace sin línea de vista (NLOS) la onda electromagnética no viaja directamente entre la estación transmisora y el receptor, existe en el trayecto objetos que interfieren con la transmisión y hacen que la señal llegue al receptor por medio de dispersiones, refracciones, difracciones y reflexiones.

Las señales que alcanzan al receptor son componentes del camino directo, caminos reflejados múltiples, energía de dispersión y caminos de propagación por difracción. Las señales poseen distintos retardos, polarizaciones y estabilidad relativos al camino directo.

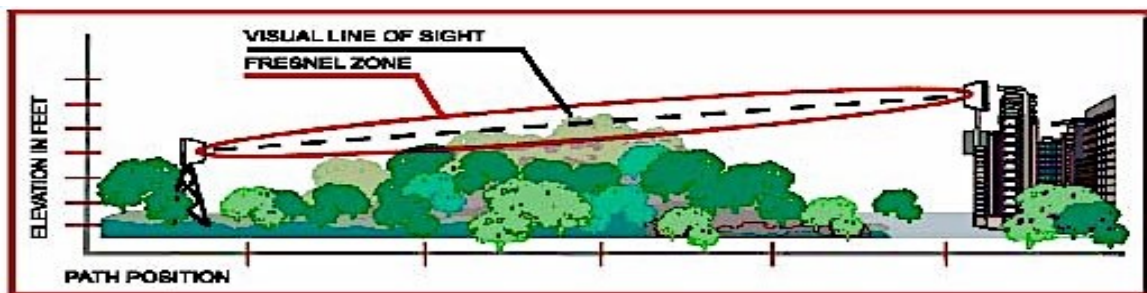


FIGURA 2.3: ENLACE SIN LÍNEA DE VISTA-NLOS.[2]

Existen varios modelos que intentan caracterizar este entorno de radio frecuencia. Estos modelos usados para predecir coberturas de gran escala para sistemas de comunicaciones inalámbricas se basan en mediciones empíricas y proveen estimaciones de pérdidas de trayecto considerando la distancia entre el transmisor y receptor, la frecuencia de operación, factores de terreno y altura de las antenas tanto Tx como en Rx.

#### **2.1.7. Modelos de propagación para WiMAX**

En el diseño de una red WiMAX es fundamental considerar la cobertura que se desea lograr en un enlace de comunicación, razón por la cual se debe contar con un modelo de predicción que permita calcular la pérdida de potencia que sufrirá una señal al transmitirse en un ambiente determinado.

Actualmente existe gran cantidad de modelos para determinar las pérdidas de propagación en comunicaciones inalámbricas, por tal motivo, se consideran únicamente modelos empíricos específicamente elaborados para sistemas con tecnología WiMAX, cuyas mediciones se realizaron en ambientes en donde la expansión de la onda no viaja directamente entre el emisor y receptor, es decir condiciones de canal de comunicación sin línea de vista (NLOS).

Generalmente se afirma que los modelos existentes ofrecen un patrón de curvas similares, no obstante puede generarse una considerable diferencia en los resultados que cada modelo arroja, esta divergencia se relaciona con la constante que cambia según las condiciones de terreno u orografía en donde se estudia la red, altura de las antenas, distancia entre el transmisor y el receptor, frecuencias de operación y con los diferentes tipos de ambientes que puede ser urbano, suburbano y rural.

Del gran conjunto de modelos de propagación existentes, los cálculos para predecir el comportamiento de las ondas de radio se realizan en base a bibliografía de los

modelos de propagación que puedan ajustarse para trabajar en las bandas de frecuencia de 2.3 GHz, 3.5 GHz y superiores, estos son los siguientes:

- ✚ Modelo de propagación en espacio libre.
- ✚ Modelos SUI (Stanford University Interim).
- ✚ Modelo 9999 de Ericsson.

#### **2.1.8. Modelo de propagación de espacio libre**

El modelo de propagación de espacio libre FSPL (Free Space Path Loss Model) es un conjunto de expresiones matemáticas que se utiliza para calcular la propagación general de la señal. Representa el rango de comunicación como un círculo alrededor del transmisor, de manera que si un receptor se ubica dentro del círculo este recibe toda la información, caso contrario los paquetes se pierden en su totalidad.[11]

FSPL define la cantidad de fuerza que la señal pierde durante la propagación entre el transmisor y receptor. La propagación en espacio libre depende de la frecuencia y de la distancia del enlace. El cálculo se hace mediante el uso de la ecuación (1).

$$PL_{FSPL}(dB) = 32.45 + 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f)$$

Dónde:

- ✚  $PL_{FSPL}(dB)$  = Pérdida de propagación en espacio libre expresada en dB.
- ✚  $F$  = Frecuencia en MHz.
- ✚  $d$  = Distancia entre el transmisor y receptor en km.

#### **2.1.9. Modelos de propagación SUI**

La Universidad de Stanford desarrolló hace un par de años un conjunto de modelos de canal para la simulación del fenómeno de multitrayectoria en sistemas LMDS.

Estos modelos se denominan (Stanford University Interim Models) comúnmente abreviados [10]SUI Models. El grupo de trabajo del IEEE 802.16 recomienda el uso del modelo SUI para la estimación de cobertura en sistemas WiMAX. Aunque fue diseñado inicialmente para una frecuencia inferior a los 3.5GHz, se ha implementado

incluyendo un parámetro de corrección para la diferencia en frecuencia, como recomienda el grupo de trabajo IEEE 802.16

El modelo SUI clasifica el terreno en tres tipos, llamados A, B y C.

- ✚ Tipo A: Experimenta las mayores pérdidas por propagación, y corresponde a terrenos montañosos con una densidad boscosa moderada o alta.
- ✚ Tipo B: Corresponde con el término medio y comprende tanto los terrenos montañosos con una densidad boscosa baja como los terrenos planos con densidad boscosa elevada o moderada.
- ✚ Tipo C: Experimenta las menores pérdidas por propagación y corresponde a zonas planas con reducida densidad de árboles.

TABLA 2.1: APLICACIÓN DE LOS MODELOS SUI EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE TERRENO.[10]

PARÁMETROS DEL MODELO	CATEGORÍA DEL TERRENO		
	TIPO A (montañosa y densidad de árboles alta)	TIPO B (plana y densidad de árboles alta)	TIPO C (plana y baja densidad de árboles)
a	4.6	4.0	3.6
b ( $m^{-1}$ )	0.0075	0.0065	0.0050
c(m)	12.6	17.1	20.0

Estas categorías de terreno proporcionan un método simple más exacto para la estimación de las pérdidas de trayecto sobre el canal de RF en condiciones de NLOS. Al ser estadística su naturaleza, el modelo puede representar una gran gama de las pérdidas de trayecto experimentadas dentro de una comunicación real en la banda de RF.

Los modelos SUI fueron seleccionados para el diseño, el desarrollo y la prueba de las tecnologías WiMAX en seis diversos panoramas, SUI-1 a SUI-6. Con el uso de estos modelos de canal es posible entonces predecir más exactamente la cobertura

que se puede alcanzar con una estación base configurada de una manera determinada, lo que claramente es un apoyo a las actividades de planeación y diseño de redes WiMAX. No obstante, existe un inconveniente práctico con los modelos SUI, y está relacionado precisamente con la clasificación de terreno para la cual aplican, pues ninguno de los seis modelos considera zonas urbanas o urbanas densas que son de hecho donde se esperan los mayores despliegues de infraestructura WiMAX.

### ***Parámetros de la Categoría del Terreno para SUI***

En los modelos de path loss adoptado por el IEEE 802.16 WG, el cual da las pérdidas de trayecto según la siguiente ecuación:

$$PL = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + S \text{ para } d > d_0$$

$$S = 0.65(\log_{10} f)^2 - 1.3 \log_{10} f^2 + \alpha$$

**Donde:**

- ✚  $A = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right)$ , con  $\lambda$  dada en metros.
- ✚  $\gamma = (a - b * h_b + \left( \frac{c}{h_b} \right))$ , y es el exponente de path loss.
- ✚  $X_f = 6.0 \log_{10} \left( \frac{f}{2000} \right)$  factor de corrección de frecuencia.
- ✚  $X_h = -10.8 \log_{10} \left( \frac{hr}{2000} \right)$  factor de corrección de altura del dispositivo móvil, para terreno A y B.[11]
- ✚  $X_h = -20.0 \log_{10} \left( \frac{hr}{2000} \right)$  factor de corrección de altura del dispositivo móvil para terreno C.[11]
- ✚  $10m < h_b < 80m$ , altura de la antena transmisora.
- ✚  $hr$  = altura del dispositivo móvil.
- ✚  $a$ ,  $b(m^{-1})$  y  $c(m)$  son constantes dependientes del tipo de terreno.
- ✚  $d_0$  es una distancia de referencia con valor de 100m.
- ✚  $S$  representa el efecto del ensombrecimiento o shadowing.[12]
  - $\alpha = 5.2dB$  para terreno rural y suburbano.
  - $\alpha = 6.6 dB$  para terreno urbano

### 2.1.10. Modelo Ericsson 9999

Este modelo fue desarrollado por ingenieros de [10] Ericsson basándose en el modelo de Okumura-Hata extendido. Originalmente el modelo fue creado en el rango de frecuencia de 150 a 1500MH [13]. Se trata de un modelo muy sencillo, donde se puede determinar su exactitud según el correcto ajuste de los parámetros libres en base a mediciones para cada región.

El modelo se puede presentar como:

$$PLU = a_0 + a_1 \cdot \log(d) + a_2 \cdot \log(hB) + a_3 \cdot \log(hB) \cdot \log(d) \\ - 3.2 (\text{Log}_{10}(11.75h_r)^2) + g(f)$$

$g(f)$  esta definido por:

$$g(f) = 44.49 \cdot \log(f) - 4.78(\log(f))^2$$

✚ f, frecuencia.

✚  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  and  $a_3$  son contantes, las cuales pueden ser modificadas para mejor acondicionamiento según el tipo de terreno específico.

✚  $h_r$ , se refiere a la altura del dispositivo móvil.

✚  $d$ , distancia.

✚  $h_b$ , antena Transmisora.

✚  $h_r$ , altura del dispositivo móvil.

TABLA 2.2: PARÁMETROS PARA EL MODELO ERICSSON.[14]

Terreno	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Urbano	36.2	30.2	12.0	0.1
Suburbano	43.20	68.93	12.0	0.1
Rural	45.95	100.6	12.0	0.1

## **CAPÍTULO 3**

### **DESARROLLO DE LA GUI EN MATLAB**

En este capítulo, se describe el proceso de diseño y desarrollo de una herramienta grafica (GUI) basada en el lenguaje MATLAB. Dicha GUI permite de un modo rápido y fácil visualizar los resultados del comportamiento de los modelos de propagación considerados en este trabajo de monografía y así poder efectuar análisis comparativos entre ellos.

El desarrollo de la GUI consta de dos partes principales: *La programación visual*, que se refiere a la creación de una interfaz gráfica para interactuar con el usuario; y *la programación por línea de códigos*, en la cual se implementan líneas de código

referentes a la matemática relacionada con la técnica de modulación o al modelo de propagación que se programa.

Esta herramienta GUI (denominada *MATLAB guide*), es un entorno de programación visual, soporta la realización y ejecución de programas de simulación a medida y de forma simple, y tiene las características básicas de cualquier plataforma de programación visuales como Visual Basic o Visual C++.[15]

Cuando creamos una aplicación en MATLAB® guide, se crean dos archivos uno .m, que es donde se programa las líneas de código y otro .fig, en el cual se colocan los objetos que interactúan con el usuario como botones, cuadros de edición, slide bars, menús, etc. Las dos partes están unidas a través de las subrutinas callback, que son las funciones que ejecutan las líneas de códigos programadas cuando interactúan con un determinado objeto.

Para ingresar a MATLAB guide digitamos en la ventana de comandos MATLAB la palabra guide o buscamos el icono de MATLAB guide en la barra de herramientas, este se encuentra junto al icono de Simulink. [16]. Esto abre la consola de edición de la parte gráfica de la aplicación a implementar (.fig), es decir, colocar botones, cuadros de diálogos, gráficas, texto, etc.



### 3.1.1. Crear una GUI en MATLAB

Abrimos MATLAB y ejecutamos el comando `>guide`.

En este se muestra la selección, elegimos la opción “Blank GUI”

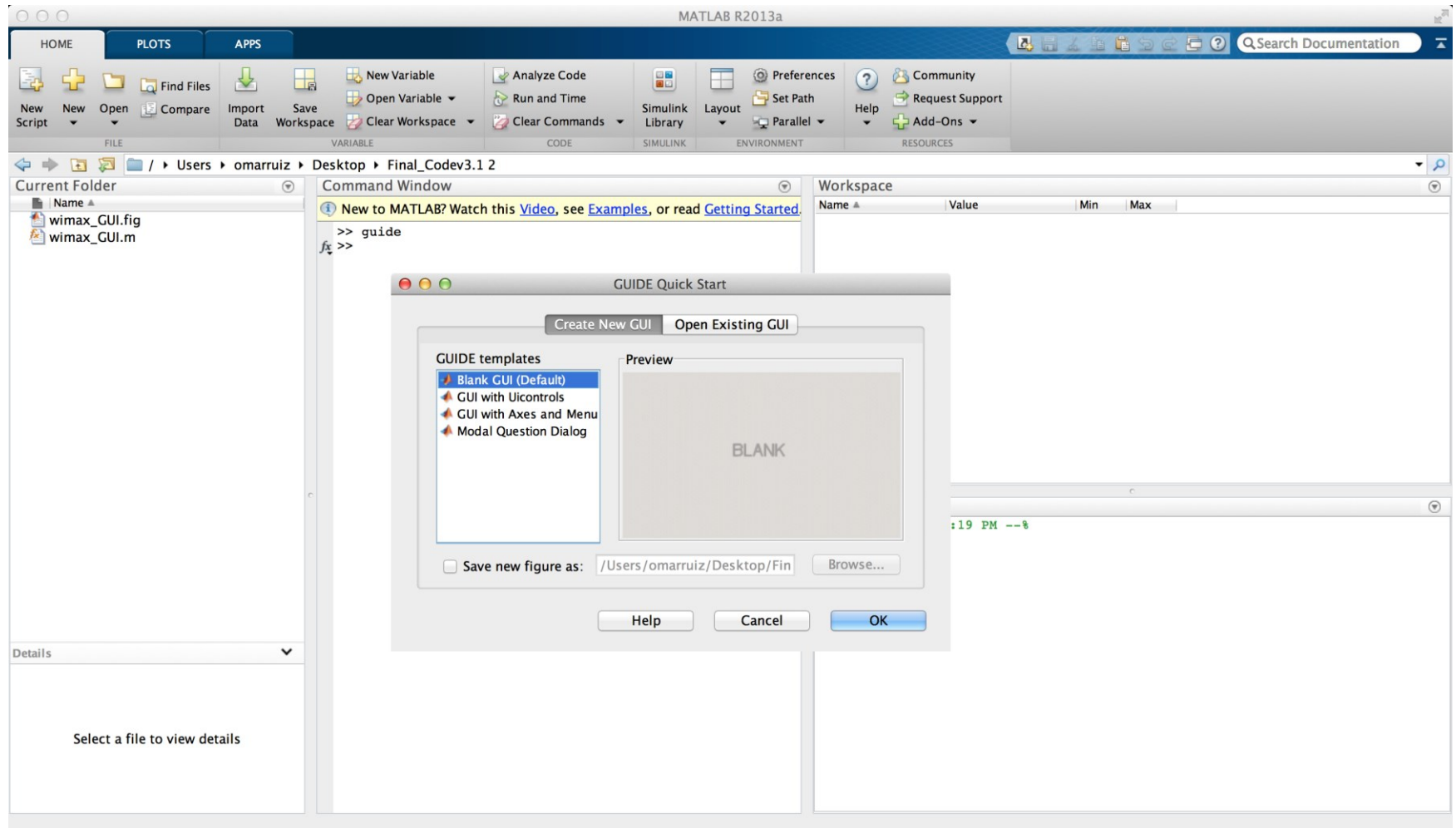


FIGURA 3.1: COMANDO GUIDE PARA CREAR LA GUI.[11]

Al presionar el botón “OK”, aparece el siguiente cuadro:

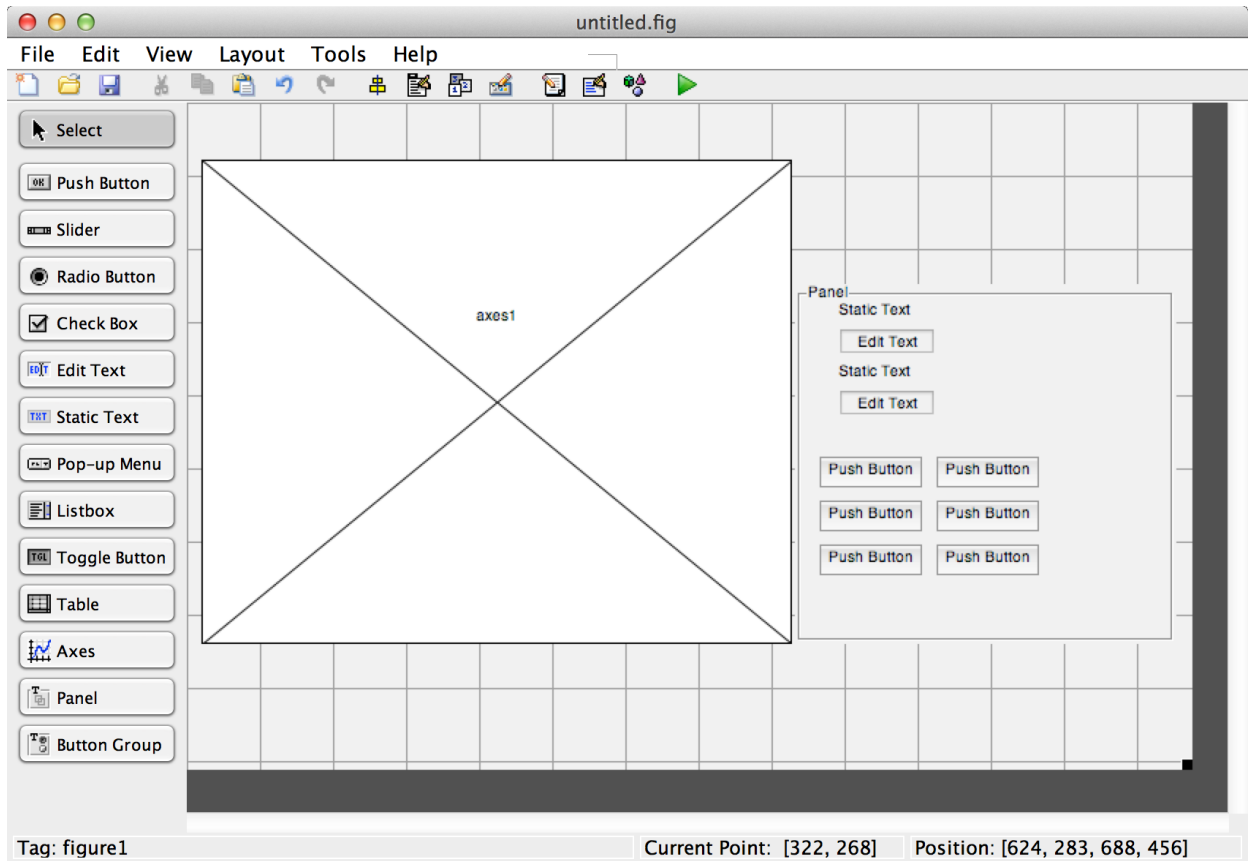






FIGURA 3.2: PANEL DE OPCIÓN PARA CREAR LA GUI.[11]

En el panel de botones de la parte izquierda del cuadro están las diferentes funcionalidades que puede tener la GUI, desde visualizadores de plot (botón Axes) hasta pop-up Menu. Estos se encuentran preestablecidos pero su uso va en dependencia de lo que se quiere mostrar y cómo van a ser usados los datos o elementos de la GUI según se requiera.

En relación a nuestro caso; la GUI consta de los siguientes elementos esenciales:

-  Edit Text
-  Static Text
-  Axes
-  Push Button

Edit Text (Edición de Texto): Este se usó para captar texto, sus entradas pueden ser de texto o enteros, (en nuestro caso) mayormente para los valores de la Frecuencia y la altura de las antenas.

Static Text (Texto Estático): Se empleó solamente para “escribir” en la GUI, principalmente para plasmar texto en ella.

Axes (Ejes): Este es donde todos los resultados son mandados a esta función para ser ploteados con el comando “plot” de MATLAB, Axes, permite ser un visualizador de datos clave en nuestra GUI.

Push Button (Botón presionador): cada botón actúa como un selector sobre el tipo de dato, en este caso, algún tipo de parámetro deseado pre programado que se quiera comparar en la GUI. Cada botón es una función, la cual realiza cálculos dentro de ella y se mandan a imprimir en la función Axes.

En realidad cada uno de los elementos de los paneles son funciones creadas dentro del código de la GUI, el código M necesario para que la GUI funcione.

Como se puede apreciar en la siguiente imagen:

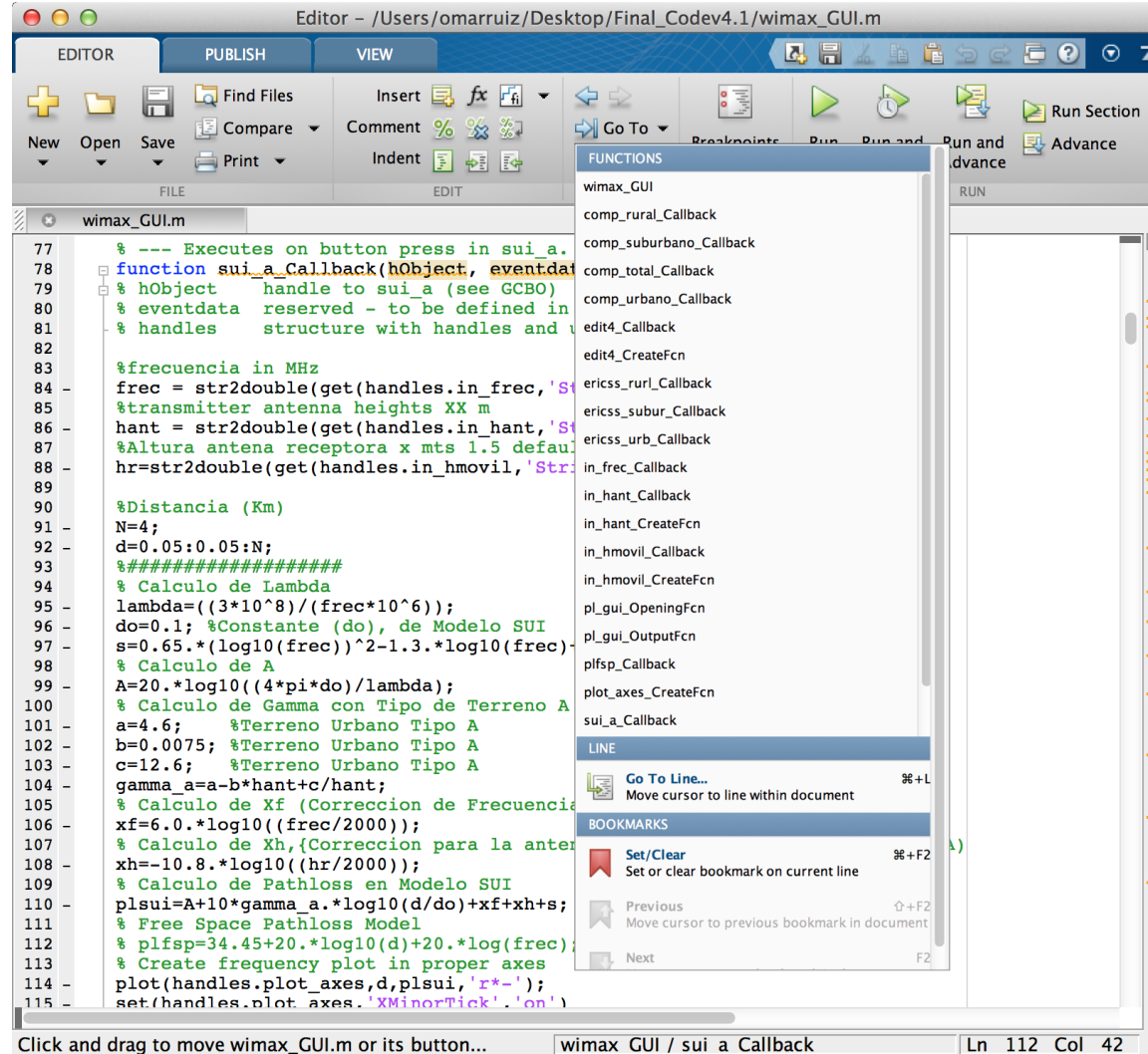


FIGURA 3.3: FUNCIONES DENTRO DEL CODIGO DE LA GUI.[11]

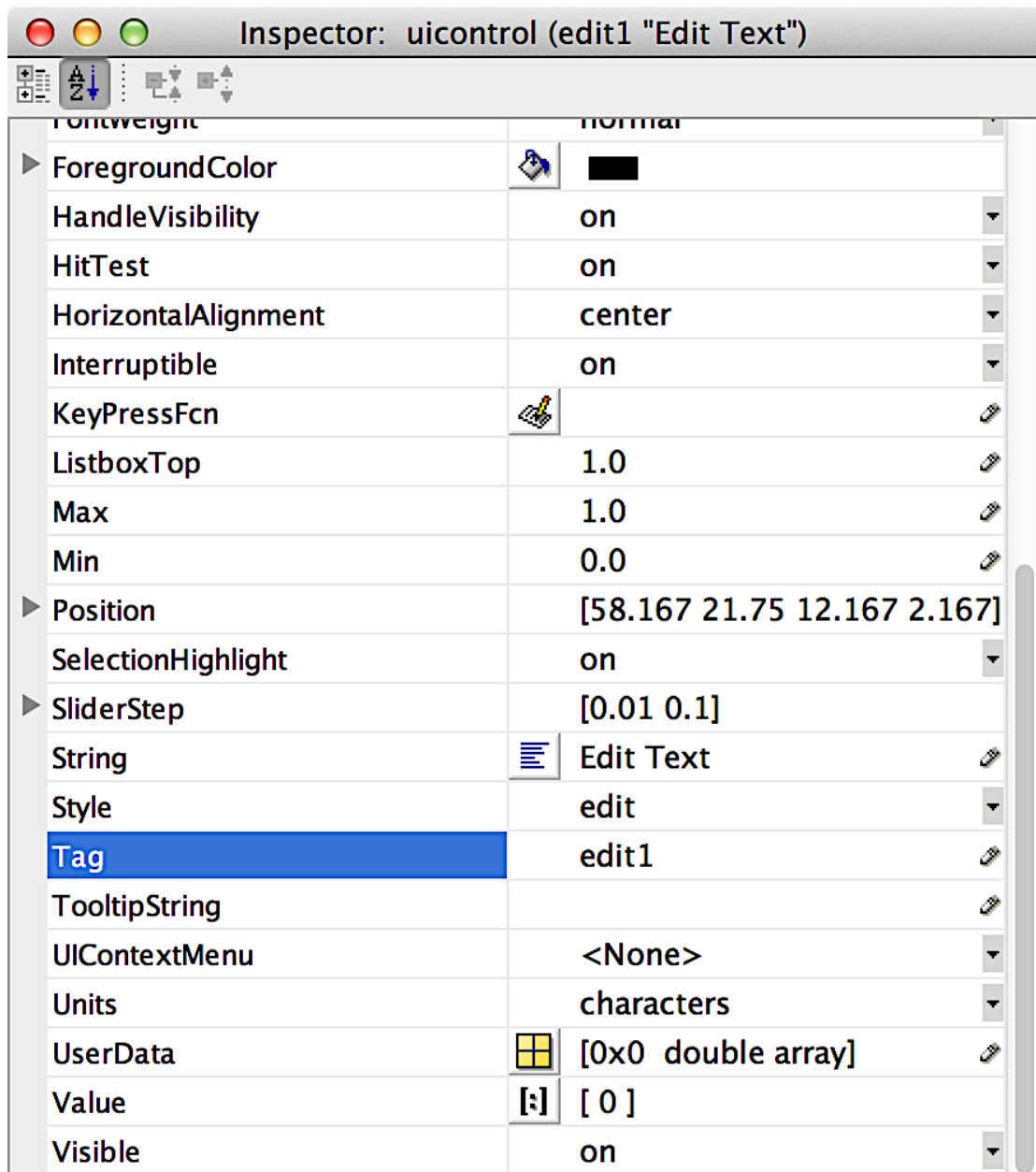






FIGURA 3.4: PROPERTY INSPECTOR.[11]

El Property Inspector (inspector de propiedades), es una utilidad meramente para el aspecto estético de la GUI, el se puede cambiar parámetros como<sup>2</sup>:

-  Posición
-  Altura
-  Color
-  Estilo de elemento, Etc.

El único valor importante usado en nuestra GUI es “Tag” o etiqueta, este valor una vez cambiado afecta el código y de no estar igual en ambos la GUI no opera apropiadamente y mostrara unas advertencias en la compilación; los demás parámetros del Property inspector no fueron cambiados a excepción de los que son estéticos, Ej.: Color.

Los modelos de propagación fueron programados con sus ecuaciones dentro de cada función, cada parámetro que varía fue aplicado en el código final y luego cada dato fue ordenado para su presentación en la función Axes.

---

<sup>2</sup> Para mayor detalle sobre parámetros de configuración de GUI, recomendamos la Ayuda de MATLAB.

### 3.1.2. Entrada/Salida de Datos de la GUI

Para obtener los datos se crearon dos diferentes funciones, una que guarda los valores de la frecuencia deseada y la otra los valores de altura de antena transmisora y altura del dispositivo móvil (receptor).

La función de que guarda los datos de la frecuencia ingresados por el usuario es `in_freq`.

```
wimax_GUI.m
191 % Hint: place code in OpeningFcn to populate plot_axes
192
193
194 function in_freq_Callback(hObject, eventdata, handles)
195 % hObject    handle to in_freq (see GCBO)
196 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
197 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
198
199 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of in_freq as text
200
201
202 freq= str2double(get(hObject,'String'));
203
204 if isnan(freq) || ~isreal(freq)
205     % isdouble returns NaN for non-numbers and f1 cannot be complex
206     % Disable the Plot button and change its string to say why
207     set(handles.sui_a,'String','Not a Number, RESTART')
208     set(handles.sui_a,'Enable','off')
209     % Give the edit text box focus so user can correct the error
210     uicontrol(hObject)
211 else
212     %Enable the Plot button with its original name
213     set(handles.sui_a,'String','SUI-A')
214     set(handles.sui_a,'Enable','on')
215 end
216
217
```

FIGURA 3.5: FUNCIÓN DE ENTRADA DE DATOS DE LA FRECUENCIA

como valores de tipo “string” son valores de caracteres de representación ASCII de un valor real o complejo escalar hicimos uso del comando `str2double`, el cual convierte el “string” a un valor de doble precisión o “double” mediante la declaración `hobject`.

Consecuente, se hizo lo mismo con la altura de la antena transmisora, solo que en este caso es otra función llamada `in_hant`.

```

243 function in_hant_Callback(hObject, eventdata, handles)
244 % hObject    handle to in_hant (see GCBO)
245 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
246 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
247
248 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of in_hant as text
249 %        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of in_hant as a double
250 hant= str2double(get(hObject,'String'));
251
252 if isnan(hant) || ~isreal(hant)
253     % isdouble returns NaN for non-numbers and fl cannot be complex
254     % Disable the Plot button and change its string to say why
255     set(handles.sui_a,'String','Not a Number')
256     set(handles.sui_a,'Enable','off')
257     % Give the edit text box focus so user can correct the error
258     uicontrol(hObject)
259 else
260     end

```

FIGURA 3.6: FUNCIÓN DE ENTRADA DE DATOS DE LA ALTURA DE LA ANTENA TRANSMISORA

luego, se hizo lo mismo con la altura del dispositivo móvil, solo que en este caso es otra función llamada in\_hmovil.

```

207
208 function in_hmovil_Callback(hObject, eventdata, handles)
209 % hObject    handle to in_hmovil (see GCBO)
210 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
211 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
212
213 % Hints: get(hObject,'String') returns contents of in_hmovil as text
214 %        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of in_hmovil as a double
215 hr= str2double(get(hObject,'String'));
216
217 if isnan(hr) || ~isreal(hr)
218     % isdouble returns NaN for non-numbers and fl cannot be complex
219     % Disable the Plot button and change its string to say why
220     set(handles.sui_a,'String','Not a Number')
221     set(handles.sui_a,'Enable','off')
222     % Give the edit text box focus so user can correct the error
223     uicontrol(hObject)
224 else
225     end

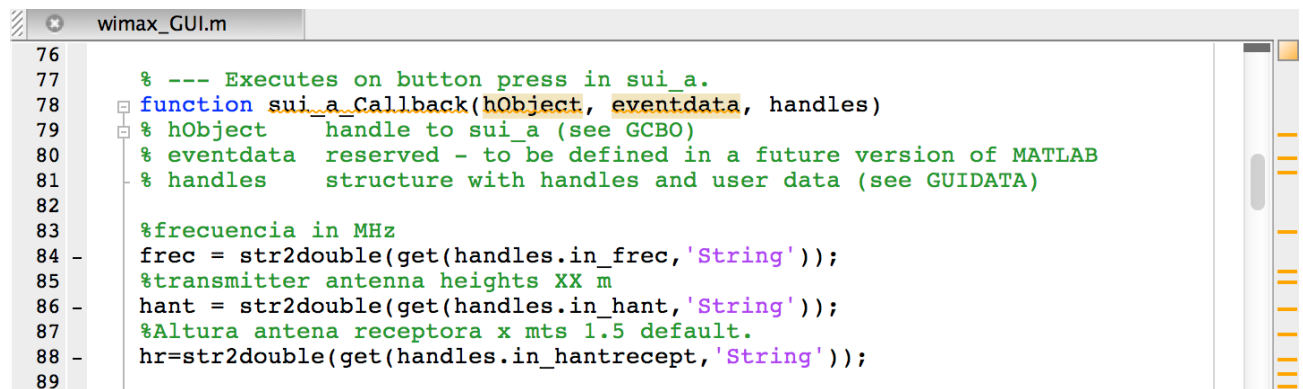
```

FIGURA 3.7: FUNCIÓN DE ENTRADA DE DATOS DE LA ALTURA DEL DISPOSITIVO MOVIL



Una vez que los datos ya tienen su espacio dentro del código, se necesita poder llevarlos a todos los modelos de propagación. Para eso se hace uso del comando “get” y la declaración “handles” con el siguiente comando:

```
frec = str2double(get(handles.in_frec,'String'));  
hant = str2double(get(handles.in_hant,'String'));  
hr=str2double(get(handles.in_hantrecept,'String'));
```



```
76  
77 % --- Executes on button press in sui_a.  
78 function sui_a_Callback(hObject, eventdata, handles)  
79 % hObject    handle to sui_a (see GCBO)  
80 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB  
81 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)  
82  
83 %frecuencia in MHz  
84 - frec = str2double(get(handles.in_frec,'String'));  
85 %transmitter antenna heights XX m  
86 - hant = str2double(get(handles.in_hant,'String'));  
87 %Altura antena receptora x mts 1.5 default.  
88 - hr=str2double(get(handles.in_hantrecept,'String'));  
89
```

FIGURA 3.8: FUNCIÓN DE SINCRONIZACIÓN DE DATOS.

En la parte *handles.in\_frec,'String'*, del comando, es la que obtiene los datos de la función *in\_frec*, que es la función que capta el ingreso de los datos de usuario, con esta simple declaración la GUI ya es capaz de hacer uso de los datos de ingreso de la frecuencia.

Como se puede ver en la siguiente figura:

```

wimax_GUI.m
77 % --- Executes on button press in sui_a.
78 function sui_a_Callback(hObject, eventdata, handles)
79 % hObject    handle to sui_a (see GCBO)
80 % eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
81 % handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
82
83 %frecuencia in MHz
84 freq = str2double(get(handles.in_freq,'String'));
85 %transmitter antenna heights XX m
86 hant = str2double(get(handles.in_hant,'String'));
87 %Altura antena receptora x mts 1.5 default.
88 hr=str2double(get(handles.in_hantrecept,'String'));
89
90 %Distancia (Km)
91 N=4;
92 d=0.05:0.05:N;
93 #####
94 % Calculo de Lambda
95 lambda=((3*10^8)/(freq*10^6));
96 do=0.1; %Constante (do), de Modelo SUI
97 s=0.65.*(log10(freq))^2-1.3.*log10(freq)+6.6; %Correccion de Shadowing
98 % Calculo de A
99 A=20.*log10((4*pi*do)/lambda);
100 % Calculo de Gamma con Tipo de Terreno A
101 a=4.6; %Terreno Urbano Tipo A
102 b=0.0075; %Terreno Urbano Tipo A
103 c=12.6; %Terreno Urbano Tipo A
104 gamma_a=a-b*hant+c/hant;
105 % Calculo de Xf (Correccion de Frecuencia a <2GHz)
106 xf=6.0.*log10((freq/2000));
107 % Calculo de Xh,{Correccion para la antena receptora} (Para Terreno Tipo A)
108 xh=-10.8.*log10((hr/2000));
109 % Calculo de Pathloss en Modelo SUI
110 plsui=A+10*gamma_a.*log10(d/do)+xf+xh+s;
111 % Free Space Pathloss Model
112 % plfsp=34.45+20.*log10(d)+20.*log(freq);
113 % Create frequency plot in proper axes
114 plot(handles.plot_axes,d,plsui,'r*-');
115 set(handles.plot_axes,'XMinorTick','on')
116 grid on
117 % plot(handles.plot_axes,d,plfsp,'b*-');
118 title('Modelo de Propagacion SUI-A Urbano');
119 xlabel('Distancia entre TX y RX en Kilometros');
120 ylabel('Pathloss en dB');
121 legend('SUI-A Urbano');
122 #####

```

wimax GUI / sui a Callback Ln 95 Col 31

FIGURA 3.9: CÓDIGO DEL MODELO SUI-A

En esta función (*sui\_a\_Callback (hObject, eventdata, handles)*)

Ya se encuentran declarados los valores de las variables: “freq”, “hant” y “hr” con el propósito de hacer uso de los datos digitados por el usuario.

Luego en la línea 110 de la figura, se observa la ecuación final del modelo de propagación SUI-A; esto de realizo de forma recursiva con todos los modelos de propagación.

### 3.1.3. GUI Finalizada

Luego de terminar las etapas de configuración de cada función anidada en los botones y ajustar el manejo de datos se tiene la GUI finalizada.

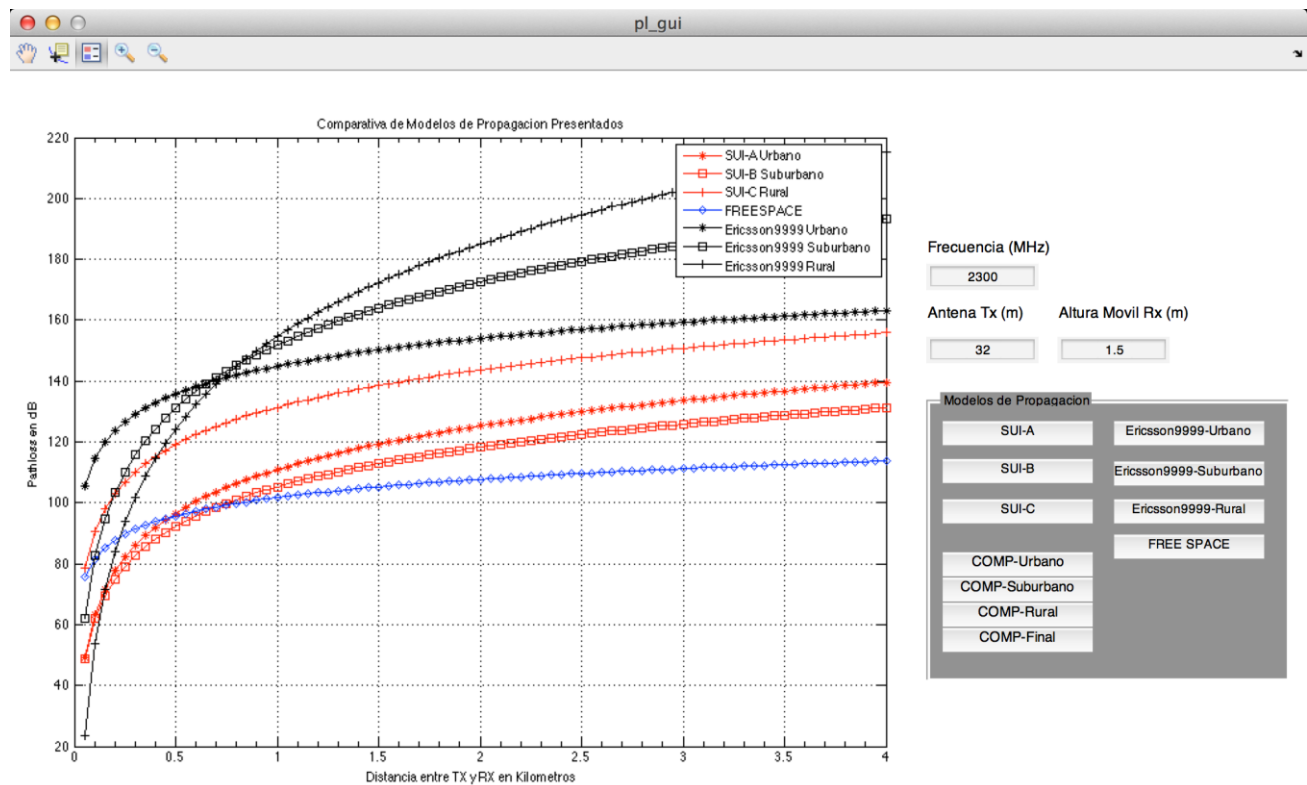


FIGURA 3.10: GUI FINALIZADA.

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN**

Para analizar cada uno de los resultados de los modelos de propagación en las diferentes frecuencias que opera WiMAX, decidimos realizar cada evaluación con tres tipos de terrenos los cuales por sus características poseen distintos tipos de pérdidas de propagación. [10]

Realizaremos cambios de frecuencias en cada uno de los terrenos para analizar el comportamiento y el desempeño de las señales y como el tipo de medio donde se transmite causa pérdidas de propagación.

El tamaño de la antena transmisora (Tx) es de 32mts.

El tamaño de la altura del dispositivo móvil (Rx), no va a variar, esta será de 1.5 mts ya que son dispositivos móviles (módems), los que se utilizan como receptores no antenas fijas.

La distancia entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) es la misma en todos los análisis (4 km), con la muestra seleccionada a 2.5 Km.

#### **4.1.1. Modelos de propagación SUI**

Para el primer análisis de los modelos de propagación analizaremos el modelo SUI tipo A , el cual tiene como criterio ser implementado en terrenos tipo urbano, utilizaremos dos distintas frecuencias: 2,300 MHz (2.3 GHz), 3,500 MHz (3.5 GHz) [11].

Para el segundo análisis analizaremos el modelos SUI tipo B, el cual tiene como criterio ser implementado en terrenos sub-urbanos, a frecuencias: 2,300 MHz (2.3 GHz), 3,500 MHz (3.5 GHz).

Para el tercer análisis analizaremos el modelos SUI tipo C, el cual tiene como criterio ser implementado en terrenos rurales, a frecuencias: 2,300 MHz (2.3 GHz), 3,500 MHz (3.5 GHz).

### ***Análisis 1.1: Terrenos tipo urbano***

Datos:

Antena Tx : 32 mts.

Frecuencia: 2,300 MHz (2.3 GHz).

Tipo de terreno: Urbano.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km.

Resultado a 2.5 Km: 129.8dB

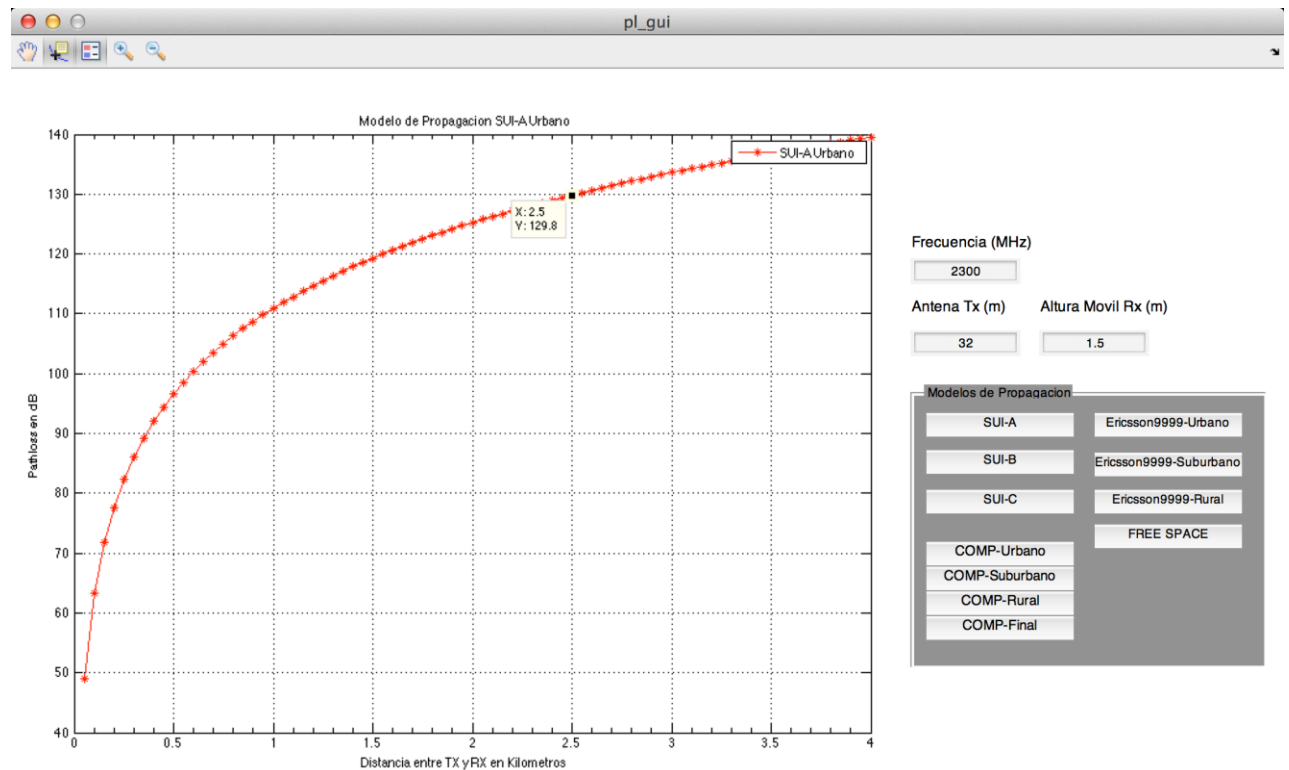


FIGURA 4.1: ANÁLISIS COMPARATIVO

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 3,500 MHz (3.5 GHz).

Tipo de terreno: Urbano.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km.

Resultado a 2.5 Km: 135.1dB

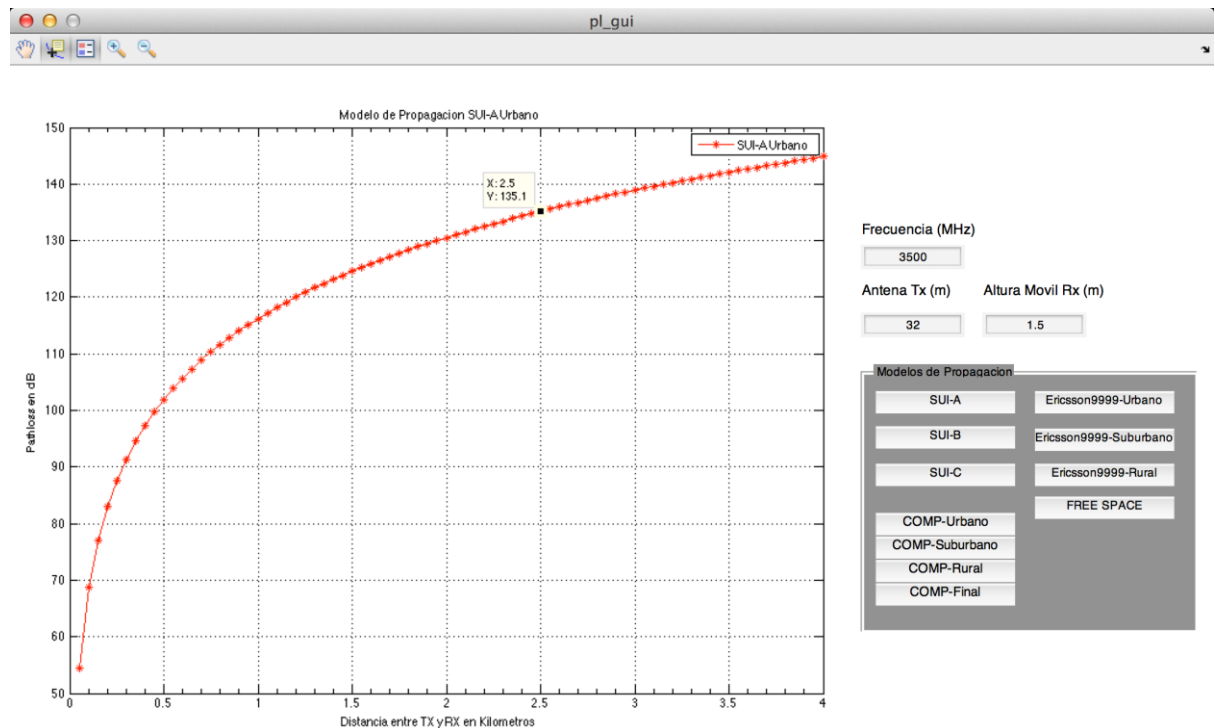


FIGURA 4.2: ANÁLISIS COMPARATIVO

TABLA 4.1: MODELO SUI-A URBANO.

Modelo SUI-A (Urbano)	
Frecuencia (MHz)	Pathloss (dB)
2300	129.8
3500	135.1

## Análisis 1.2: Terrenos sub-urbanos

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 2,300 MHz (2.3 GHz).

Tipo de terreno: Sub-urbano.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km.

Resultado a 2.5Km: 122.4dB

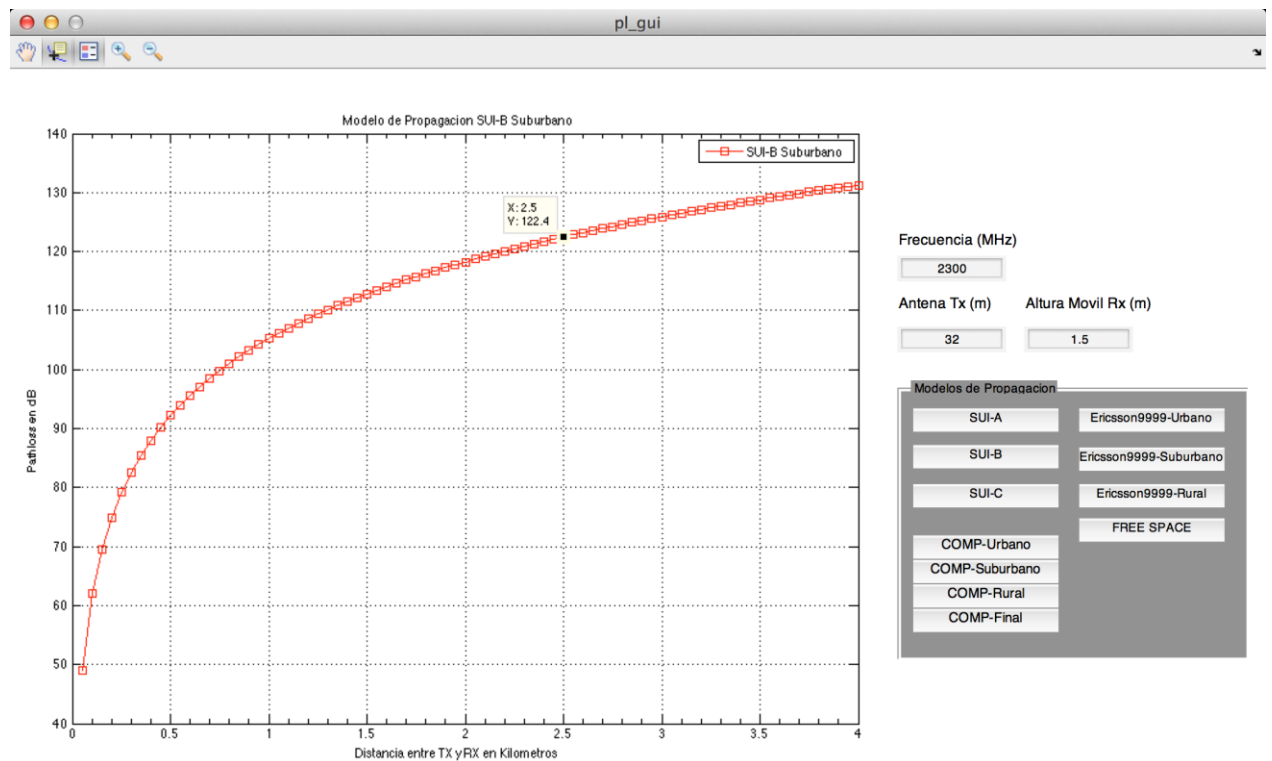


FIGURA 4.3: ANÁLISIS COMPARATIVO

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 3,500 MHz (3.5 GHz).

Tipo de terreno: Sub-urbano.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km.

Resultado a 2.5Km: 127.8dB

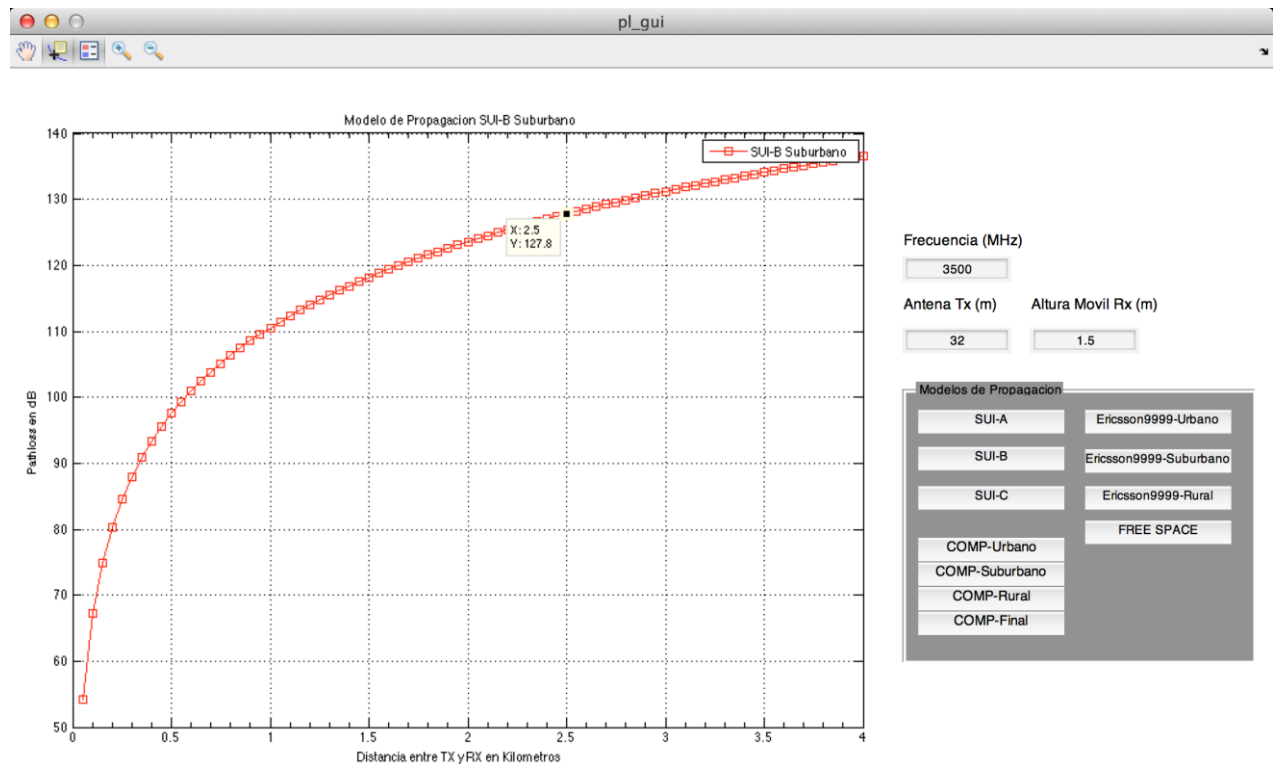


FIGURA 4.4: ANÁLISIS COMPARATIVO

TABLA 4.2: MODELO SUI-B SUB-URBANO.

Modelo SUI-B (Sub Urbano)	
Frecuencia (MHz)	Pathloss (dB)
2300	122.4
3500	127.8



### ***Análisis 1.3: Terrenos tipo Rural***

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 2,300 MHz (2.3 GHz).

Tipo de terreno: Rural.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km.

Resultado a 2.5Km: 147.5dB

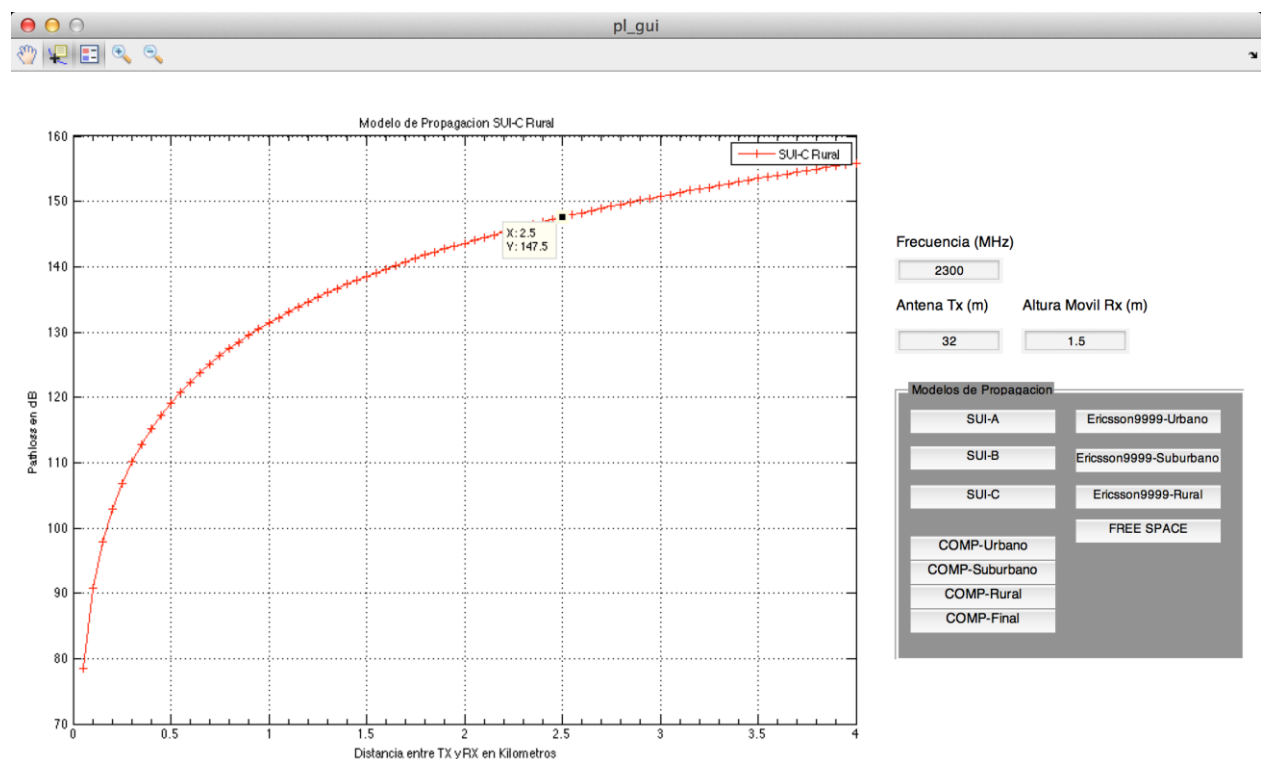


FIGURA 4.5: ANÁLISIS COMPARATIVO

Datos:

Antena Tx: 15 mts.

Frecuencia: 3,500 MHz (3.5 GHz).

Tipo de terreno: Rural.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km.

Resultado a 2.5Km: 152.9dB

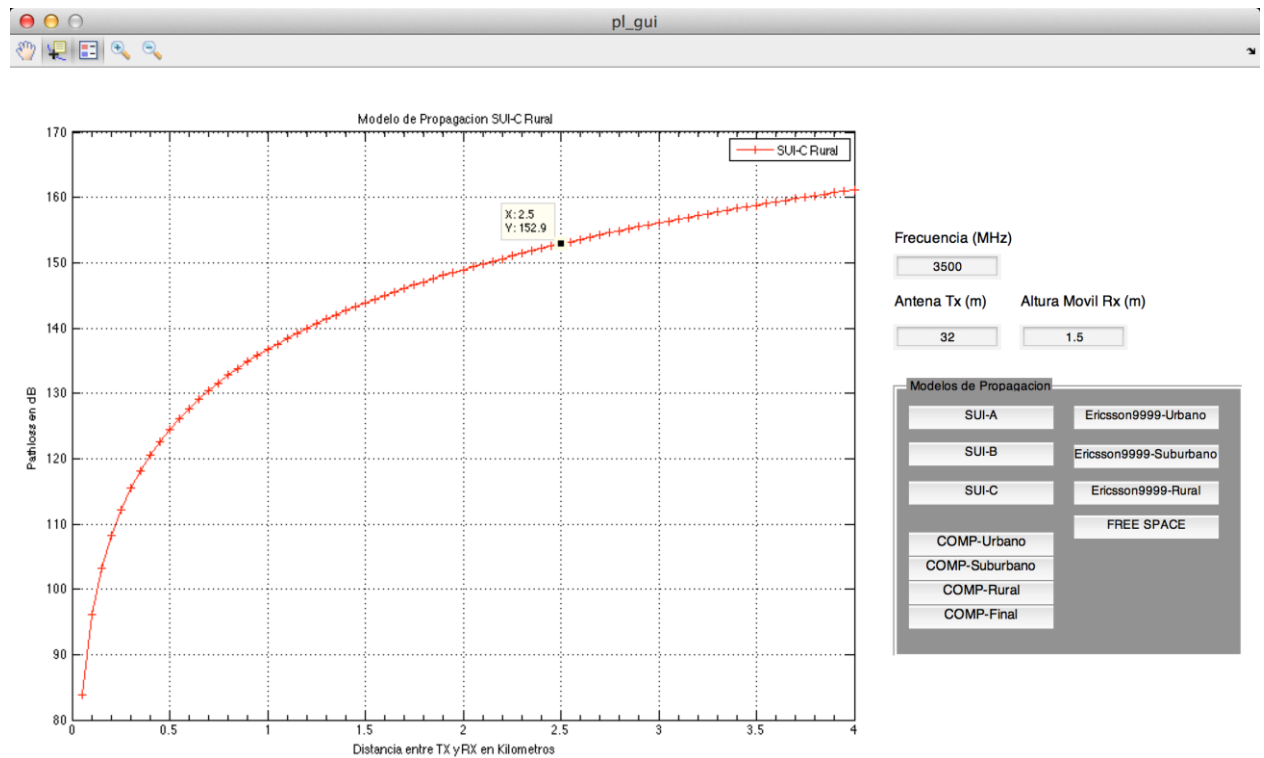


FIGURA 4.6: ANÁLISIS COMPARATIVO

TABLA 4.3: MODELO SUI-C RURAL

Modelo SUI-C (Rural)	
Frecuencia (MHz)	Pathloss (dB)
2300	147.5
3500	152.9

#### **4.1.2. Modelos de propagación Ericsson 9999**

Para el primer análisis del modelo de propagación analizaremos el modelos Ericsson 9999, con la variante a ser implementado en terrenos tipo urbano, utilizaremos dos distintas frecuencias: 2,300 MHz (2.3 GHz), 3,500 MHz (3.5 GHz).

Para el segundo análisis analizaremos el modelo Ericsson 9999, con la variante a ser implementado en terrenos sub-urbanos, a dos distintas frecuencias: 2,300 MHz (2.3 GHz), 3,500 MHz (3.5 GHz).

Para el tercer análisis analizaremos el modelos Ericsson 9999, con la variante a ser implementado en terrenos rurales, a dos distintas frecuencias: 2,300 MHz (2.3 GHz), 3,500 MHz (3.5 GHz).

#### ***Análisis 1.4: Terrenos tipo urbano***

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 2,300 MHz (2.3 GHz).

Tipo de terreno: Ericsson Urbano.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km

Resultado a 2.5Km: 156.9dB

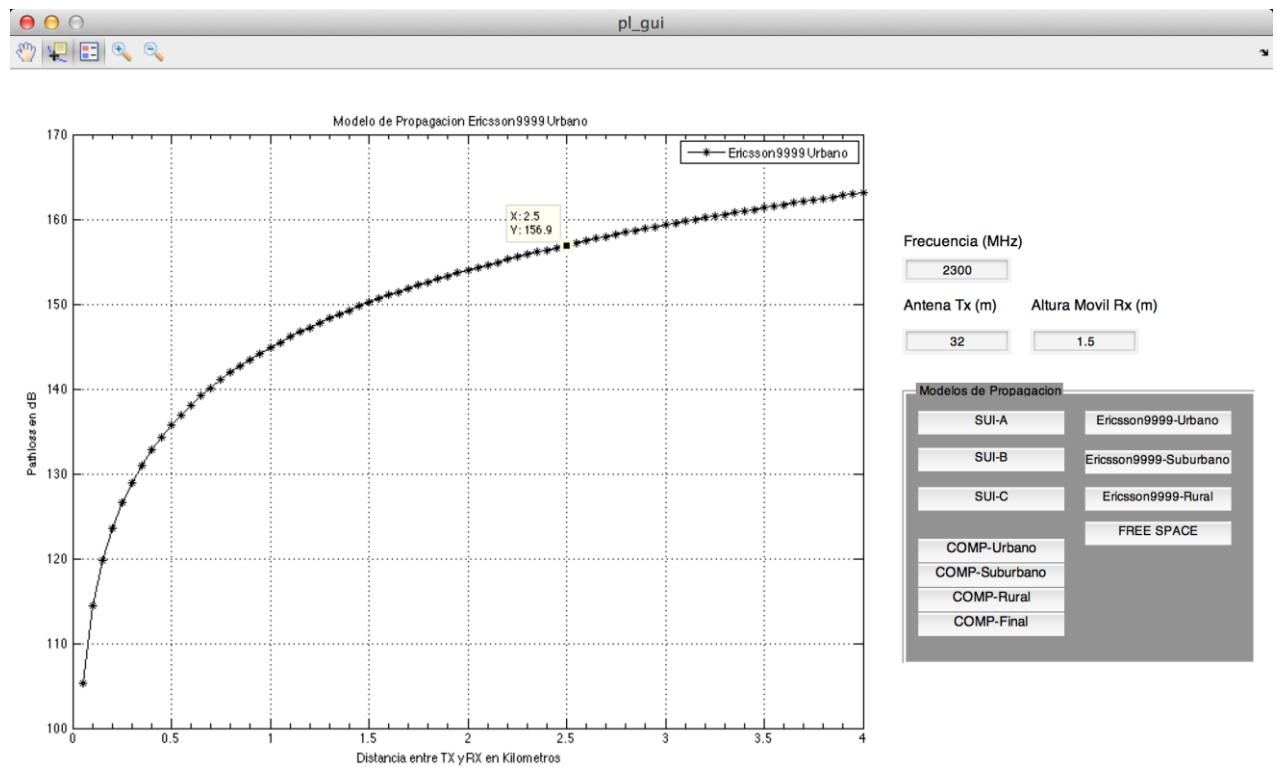


FIGURA 4.7: ANÁLISIS COMPARATIVO

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 3,500 MHz (3.5 GHz).

Tipo de terreno: Ericsson Urbano.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km

Resultado a 2.5Km: 159dB

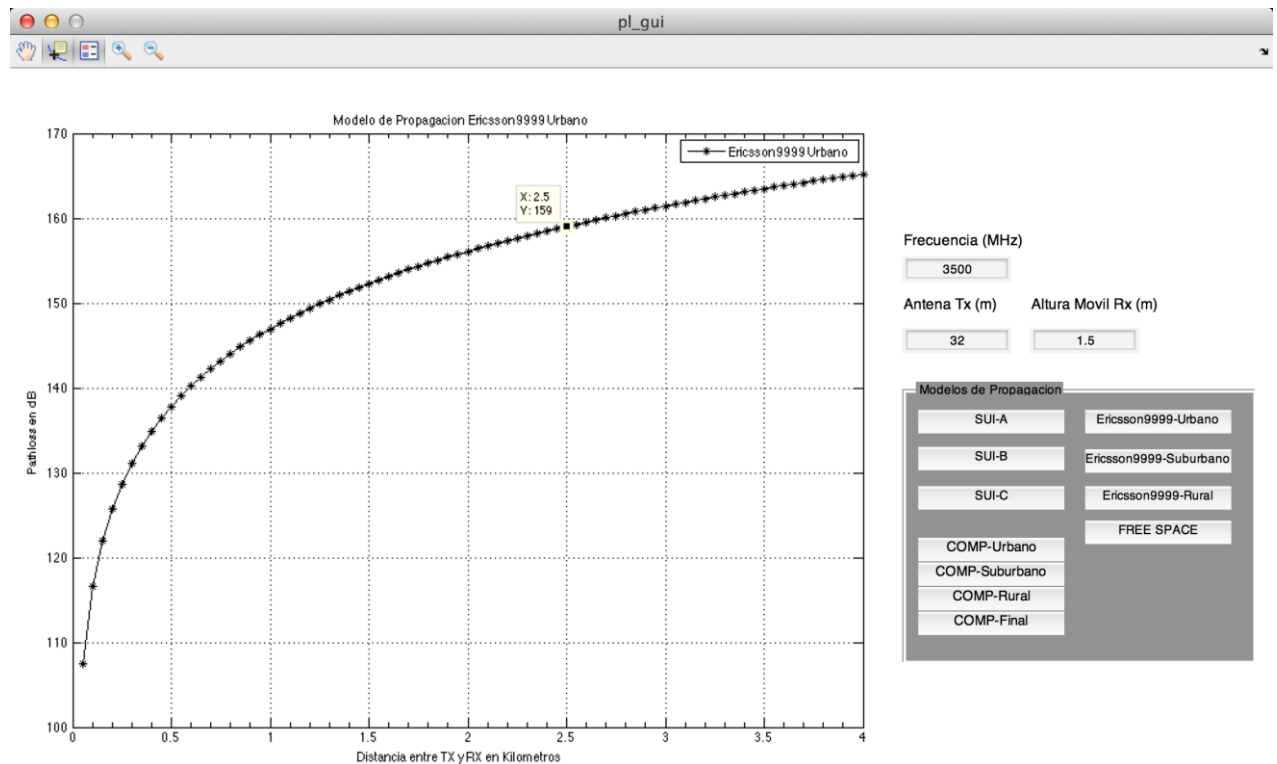


FIGURA 4.8: ANÁLISIS COMPARATIVO

TABLA 4.4: MODELO ERICSSON 9999 URBANO.

Modelo Ericsson 9999 (Urbano)	
Frecuencia (MHz)	Pathloss (dB)
2300	156.9
3500	159

### ***Análisis 1.5: Terrenos tipo Sub-urbano***

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 2,300 MHz (2.3 GHz).

Tipo de terreno: Ericsson Sub-urbano.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km

Resultado a 2.5Km: 179.3dB

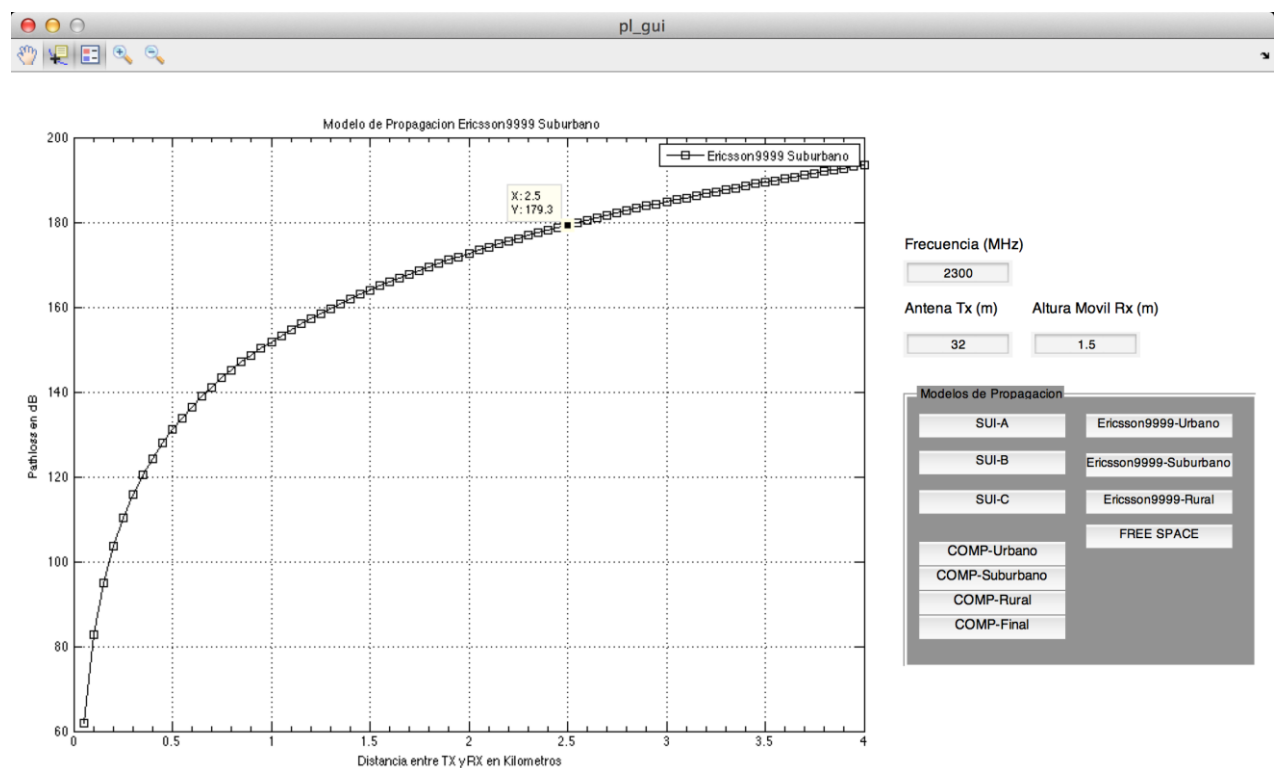


FIGURA 4.9: ANÁLISIS COMPARATIVO

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 3,500 MHz (3.5 GHz).

Tipo de terreno: Ericsson Sub-urbano.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km

Resultado a 2.5Km: 181.4dB

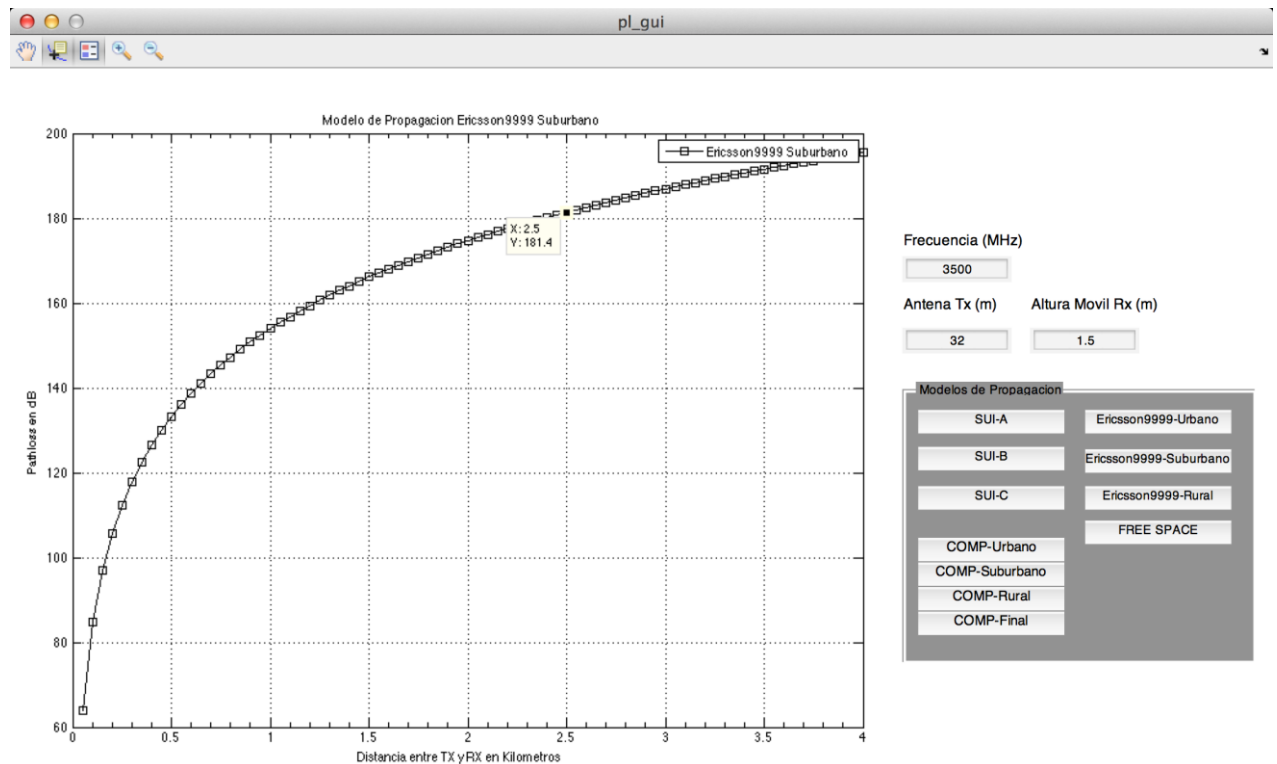


FIGURA 4.10: ANÁLISIS COMPARATIVO.

TABLA 4.5: MODELO ERICSSON 9999 SUB-URBANO.

Modelo Ericsson 9999 (Sub-urbano)	
Frecuencia (MHz)	Pathloss (dB)
2300	179.3
3500	181.4

### ***Análisis 1.6: Terrenos tipo Rural***

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 2,300 MHz (2.3 GHz).

Tipo de terreno: Ericsson Rural.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km

Resultado a 2.5Km: 194.7dB

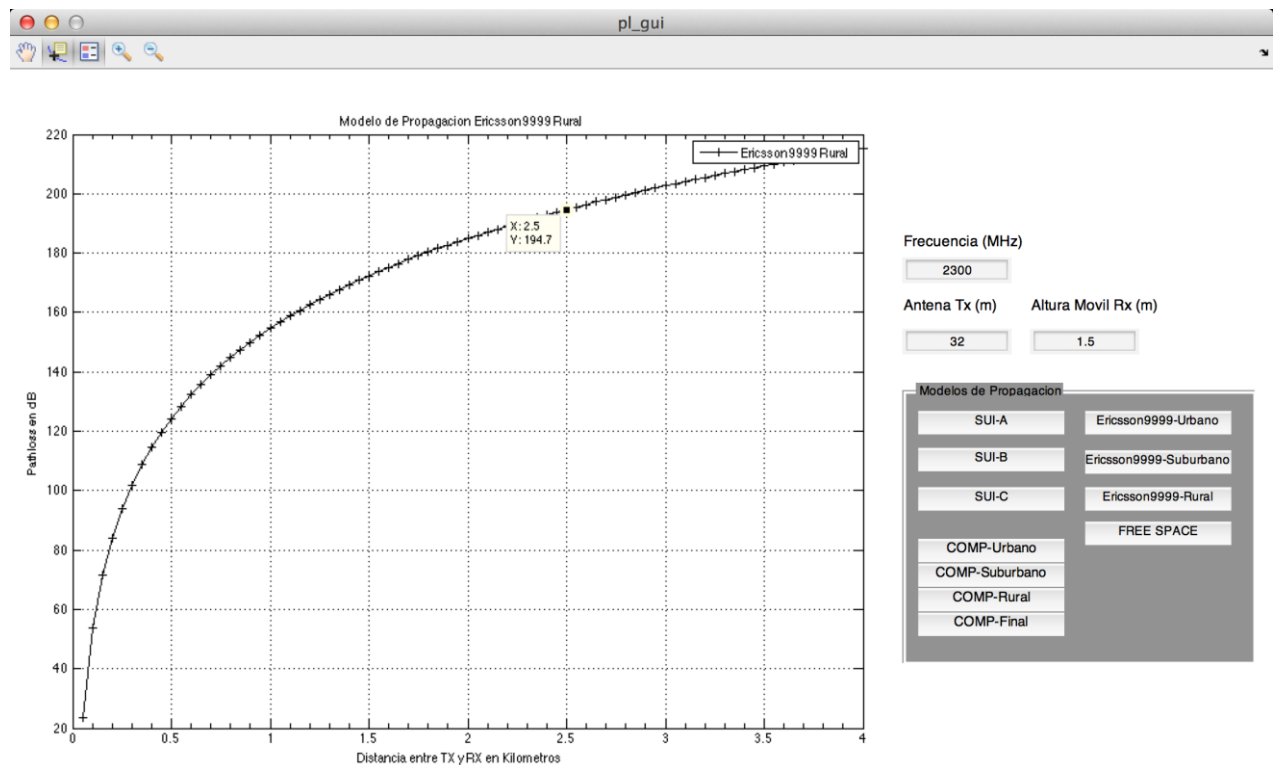


FIGURA 4.11: ANÁLISIS COMPARATIVO



Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 3,500 MHz (3.5 GHz).

Tipo de terreno: Ericsson Rural.

Distancia entre Tx y Rx: 4 km

Resultado a 2.5Km: 196.8dB

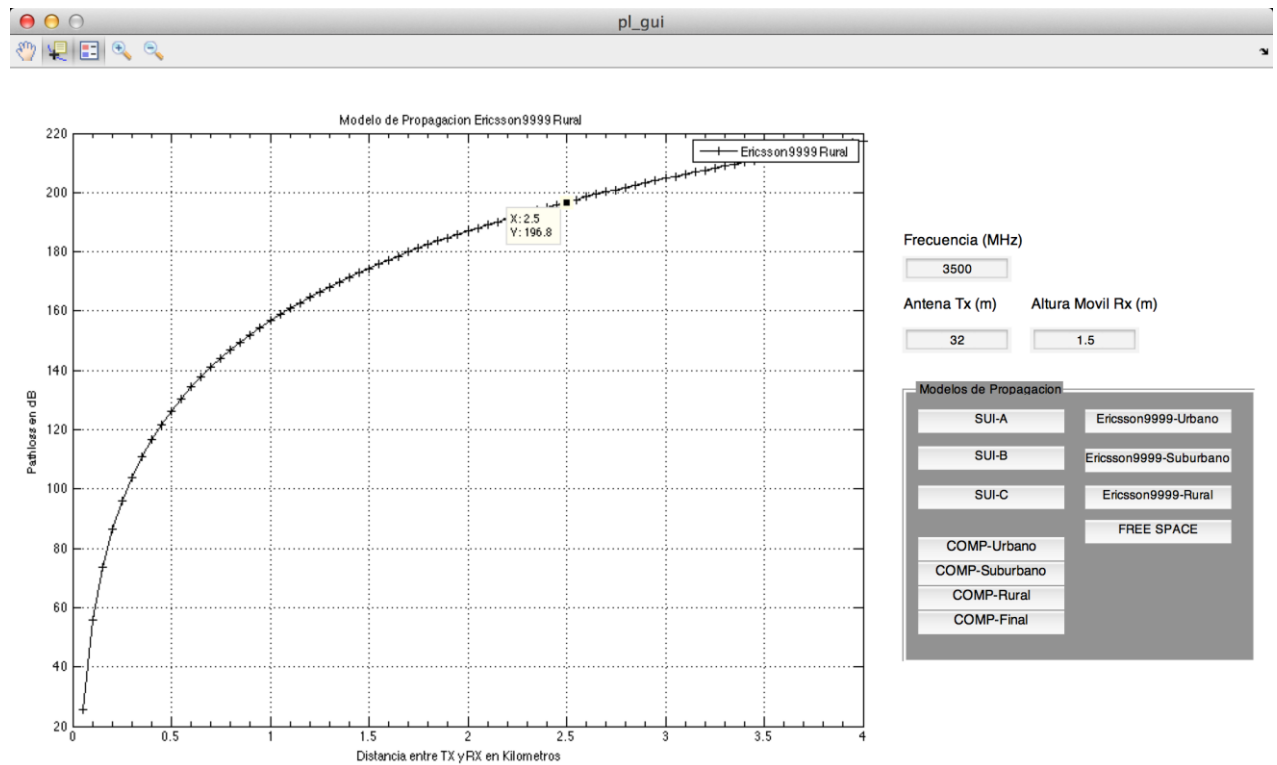


FIGURA 4.12: ANÁLISIS COMPARATIVO

TABLA 4.6: MODELO ERICSSON 9999 RURAL.

Modelo Ericsson 9999 (Rural)	
Frecuencia (MHz)	Pathloss (dB)
2300	194.7
3500	196.8

### 4.1.3. Modelos de propagación de espacio libre

Para este análisis utilizamos el modelos de propagación de espacio libre, bajo las dos distintas frecuencias 2.3 GHz y 3.5 GHz ya que dicho modelo no se utiliza para un determinado tipo de terreno decidimos implementarlos de manera general en el espacio libre.

#### ***Análisis 1.7: Espacio Libre***

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 2,300 MHz (2.3 GHz)

Distancia entre Tx y Rx: 4 km

Resultado a 2.5Km: 109.6dB

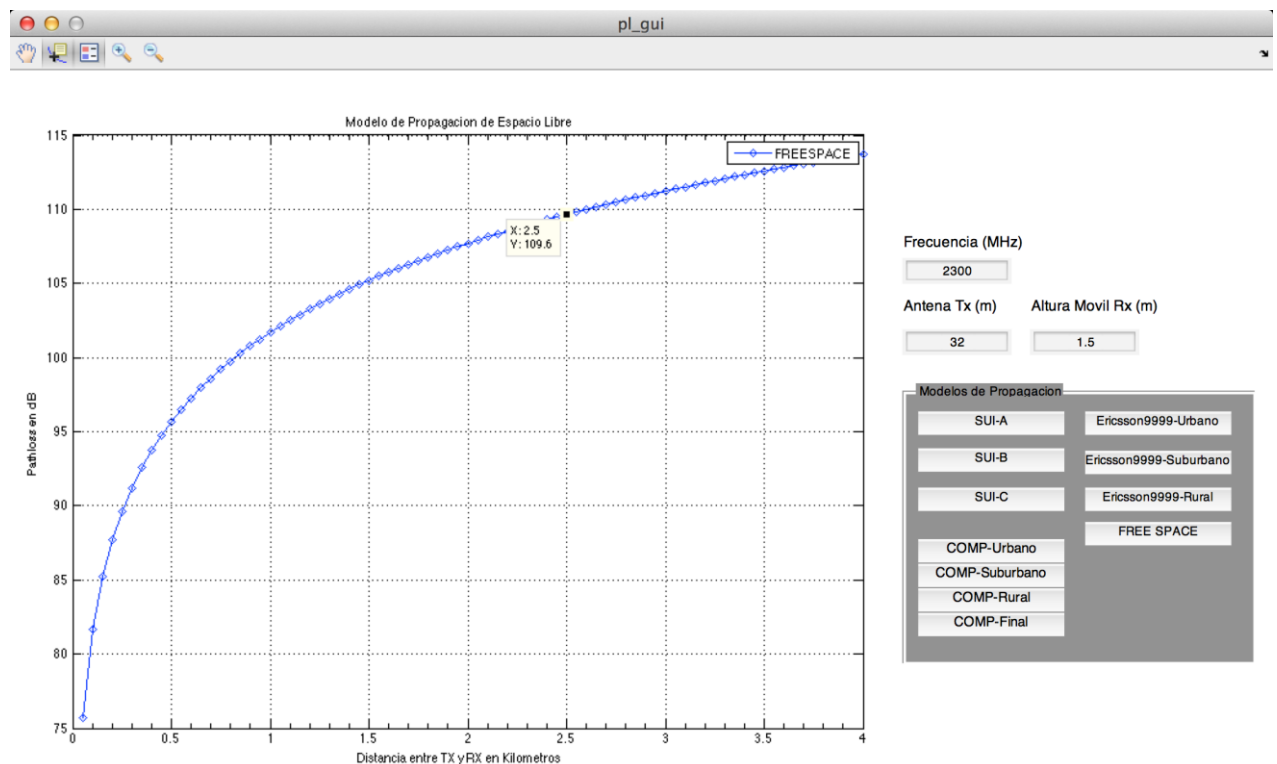


FIGURA 4.13: ANÁLISIS COMPARATIVO

Datos:

Antena Tx: 32 mts.

Frecuencia: 3,500 MHz (3.5 GHz)

Distancia entre Tx y Rx: 4 km

Resultado a 2.5Km: 113.3dB

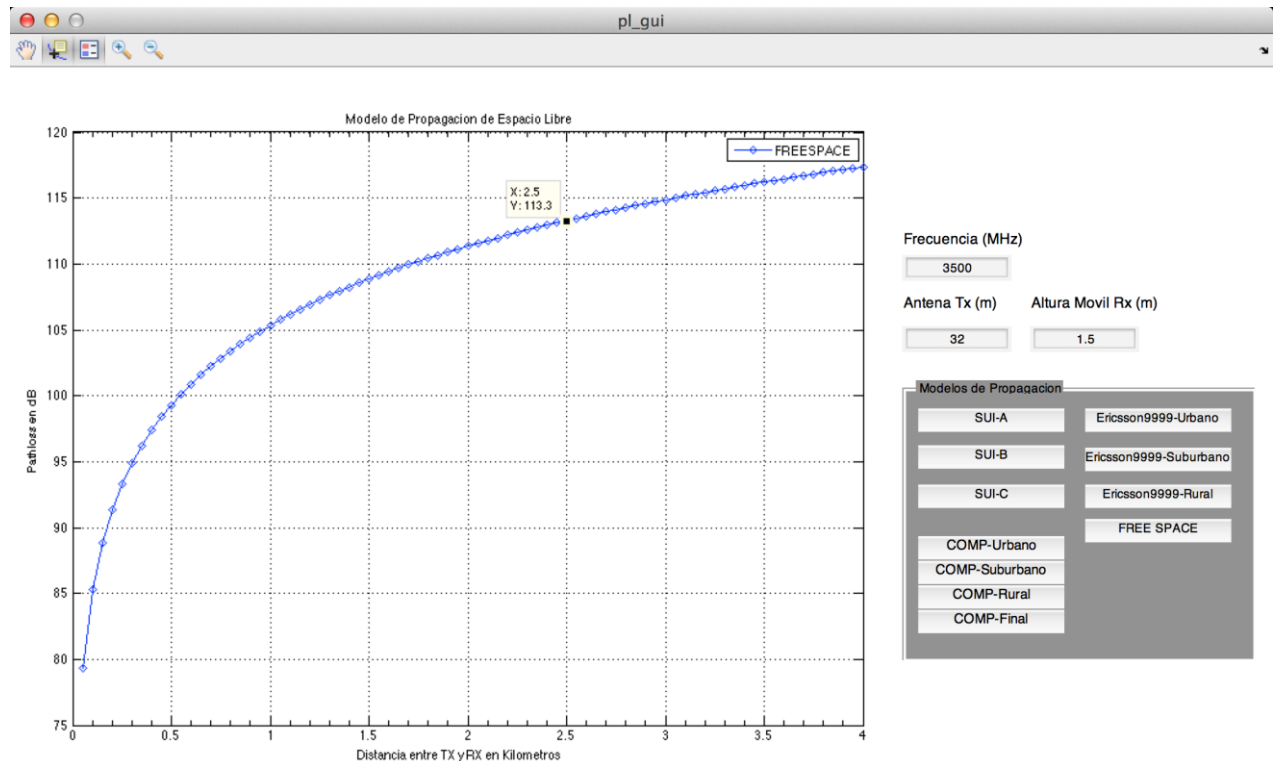


FIGURA 4.14: ANÁLISIS COMPARATIVO

TABLA 4.7: MODELO DE ESPACIO LIBRE.

Modelo de Espacio Libre	
Frecuencia (MHz)	Pathloss (dB)
2300	109.6
3500	113.3

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Antes de empezar con el análisis de los modelos definiremos las variables que tomamos en cuenta para realizar dicha tarea. Decidimos tomar las medidas de pérdidas de propagación a una distancia de 2.5 km del transmisor (Tx) al receptor (Rx), la altura de la antena transmisora a 32 m y la altura del dispositivo móvil a 1.5 m con las dos diferentes frecuencias 2.3 GHz y 3.5 GHz respectivamente en todos los terrenos a los cuales serán sometidos los modelos de propagación.

#### 5.1.1. Análisis de simulación en un área urbana

En los resultados obtenidos que se muestran en la figura 5.1, en el área urbana, podemos observar que el modelo de propagación de espacio libre es que el que presenta la menor pérdida de propagación (109.6 dB a 113.3 dB) seguido de modelo SUI-A Urbano con una pérdida de (129.8 dB a 135.1 dB) y muy por debajo se sitúa el modelo Ericsson 9999 urbano con una pérdida de propagación de (156.9 dB a 159 dB).

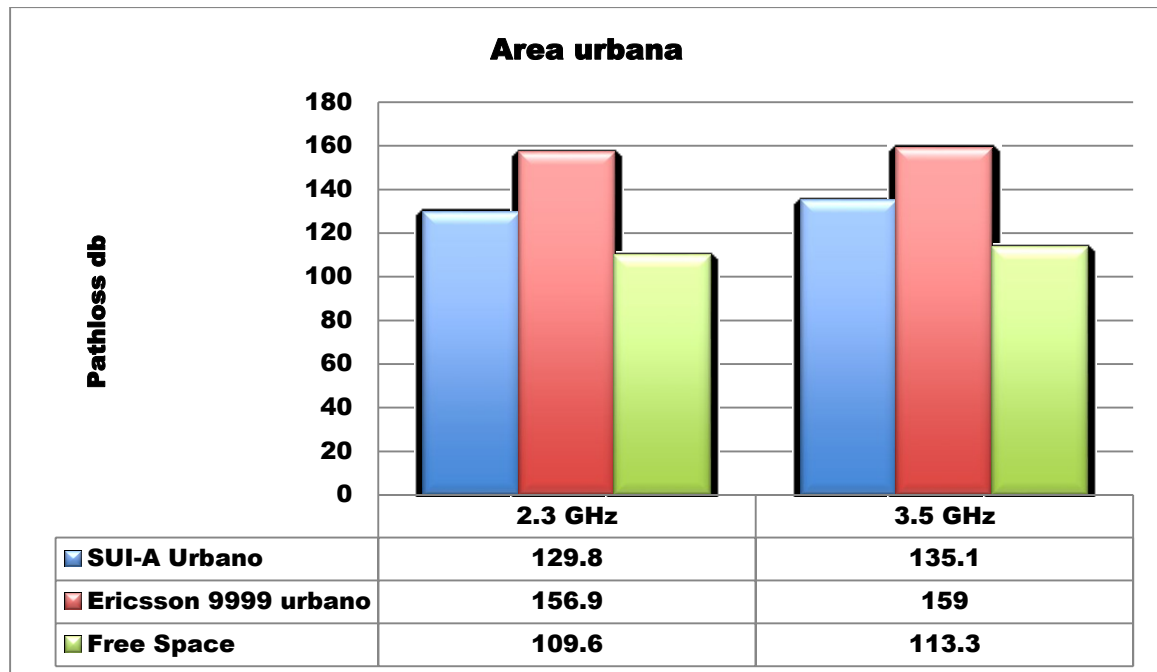


FIGURA 5.1: ANÁLISIS DE PATHLOSS EN UN ÁREA URBANA

### 5.1.2. Análisis de simulación en un área sub-urbana

Continuando con los resultados obtenidos que se muestran en la figura 5.2, en el área suburbana, podemos observar que el modelo de propagación de espacio libre es que el que presenta la menor perdida de propagación (109.6 dB a 113.3 dB) seguido de modelo SUI-A Suburbano con una pérdida de (122.4 dB a 127.8 dB) y muy por debajo se sitúa el modelo Ericsson 9999 Suburbano con una pérdida de propagación de (179.3 dB a 181.4 dB).

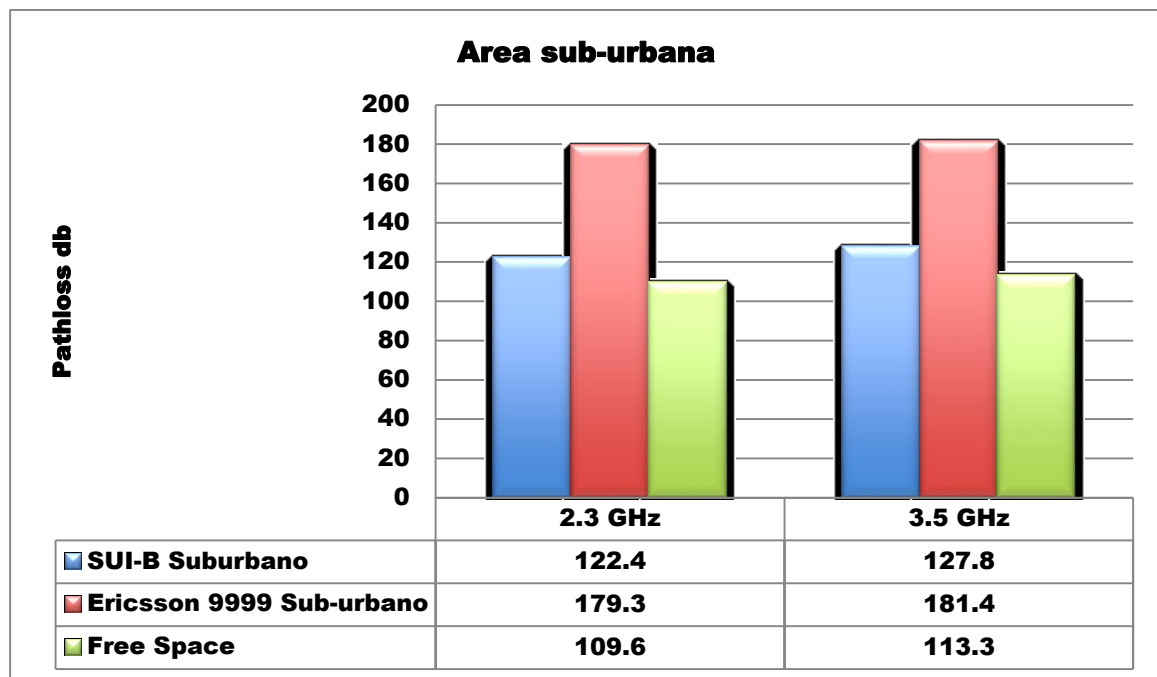


FIGURA 5.2: ANÁLISIS DE PATHLOSS EN UN ÁREA SUB-URBANA.

### 5.1.3. Análisis de simulación en un área rural

En la última parte de los resultados que se muestran en la figura 5.3, en el área Rural, podemos observar que el modelo de propagación de espacio libre es que el que presenta la menor pérdida de propagación (109.6 dB a 113.3 dB) seguido de modelo SUI-C Rural con una pérdida de (147.5 dB a 152.9 dB) y muy por debajo se sitúa el modelo Ericsson 9999 Rural con una pérdida de propagación de (194.7 dB a 196.8 dB).

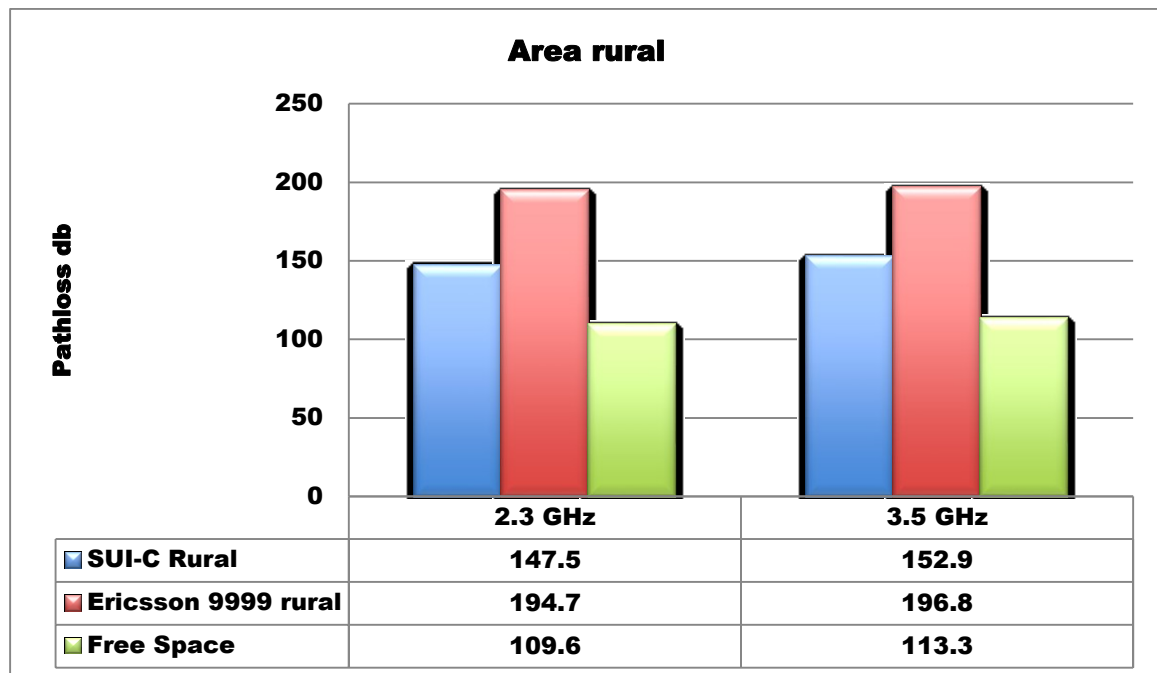


FIGURA 5.3: ANÁLISIS DE PATHLOSS EN UN ÁREA RURAL.

### 5.1.4. Guia de laboratorio

Como etapa final de ese proceso y por ende un aporte de este trabajo a la carrera de telecomunicaciones, presentamos la guia de laboratorio que explica como usar la GUI junto con preguntas de control para los estudiantes, asumimos que será usada para estudiantes de los últimos dos años de la carrera de telecomunicaciones, 4to y 5to año así que estos poseen los conocimientos necesarios para responder las preguntas de control de la guia.



# Universidad Nacional de Ingeniería

## Facultad de Electrotecnia y Computación

Guía de laboratorio No:	
Materia:	

- I. Práctica de laboratorio: Análisis de modelos de propagación
- II. Medios a utilizar:

Computadora	Que cumpla los requerimientos del software a implementar o utilizar.
Software	MATLAB R2013a versión 8.1 o superior.

- III. Componentes/Dispositivos:  
Ninguno.

- IV. Objetivos:

Analizar los modelos de propagación para tecnología tipo WiMAX a las frecuencias 2.3 GHz y 3.5 GHz.

### V. INTRODUCCIÓN: MODELOS DE PROPAGACIÓN

Un modelo de propagación básicamente predice lo que sucederá con la señal transmitida entre el transmisor (Tx) y el receptor (Rx). La ruta que sigue la señal desde el origen a su destino puede ser un ambiente en el cual exista línea de vista (LOS) o un ambiente con una gran cantidad de obstáculos tales como montañas, edificios o árboles.

Un modelo de propagación se define como el conjunto formulaciones matemáticas empíricas, datos estadísticos o de distribuciones de densidad probabilísticas, que se utilizan para predecir la pérdida de una señal inalámbrica o señal RF (Radio

Frecuency) en la trayectoria de recorrido entre una estación base emisor y un cliente receptor fijo o móvil. Las pérdidas de señal se expresan en decibeles.

El objetivo de utilizar y aplicar los diferentes modelos de propagación propuestos es determinar cuál o cuáles serían los más idóneos para realizar el despliegue en dicha zona o terreno.

Clasificación de los modelos de propagación.

Los modelos de propagación generalmente se clasifican en los siguientes tipos: empíricos o estadísticos, teóricos o deterministas y una combinación de estos dos llamados semi-empíricos.

Modelos empíricos

Este tipo de modelos trabajan con la extrapolación estadística de resultados a partir de mediciones previamente realizadas sobre el terreno. Se desarrollan en base a mediciones realizadas en laboratorio o con modelos a escala de los ambientes de propagación. La principal ventaja de los modelos empíricos es que manejan de forma implícita todos los factores de propagación que influyen en el entorno. Su precisión depende de la exactitud de sus medidas y de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas las medidas y el entorno a analizar.

Modelos teóricos

Predicen en base a los principios fundamentales del medio que se desea modelar, por ejemplo los principios de la física si se modelan fenómenos físicos. La precisión en los cálculos es su principal ventaja. Para utilizar estos modelos se requieren grandes bases de datos con las características del entorno a estudiar, información que generalmente es difícil de obtener. Maneja algoritmos complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se limita a pequeñas áreas.

Modelos semi-empíricos

Los resultados que estos modelos generan tienen distribución de probabilidad. Combinan leyes físicas del fenómeno a modelar y factores de corrección empíricos que adaptan el modelo al entorno en el que desea trabajar. La figura 2.1 explica gráficamente la clasificación de los modelos de propagación.



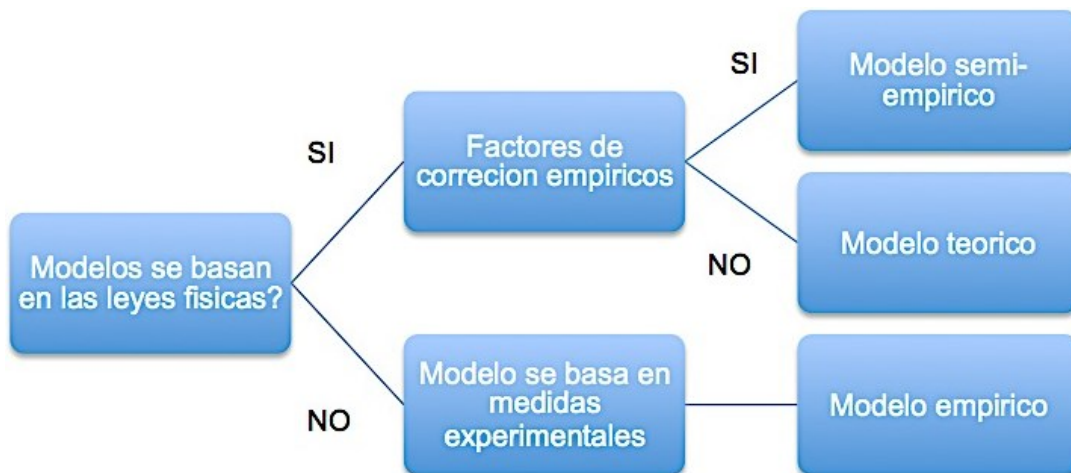


Figura 1: Clasificación de los modelos de propagación.

#### VI. Procedimiento:

1. Abra el programa MATLAB desde el escritorio o escriba MATLAB en el buscador de programas de su Pc.
2. Cargue el archivo .m que será facilitado por el tutor de la materia impartida.
3. Una vez cargado el archivo en el programa aparecerá otra ventana de clic en RUN y aparecerá la GUI con la cual usted va a trabajar y analizar el comportamiento de los modelos de propagación .
4. Introduzca la frecuencia de 2300 MHz, altura de la antena transmisora (Tx) 35 mts, altura del dispositivo móvil (Rx) a 1.5 mts.
5. De clic en el botón comp-urbano botón para empezar el análisis de los modelos de propagación para el terreno tipo de urbano .
6. Analice la curva de perdida (pathloss) y conteste la siguiente pregunta.
7. Porque en el modelo de espacio libre es el que posee menor pathloss?
8. Aumente la frecuencia a 3500 MHz, altura de la antena transmisora (Tx) 35 mts, altura del dispositivo móvil (Rx) a 1.5 mts.
9. De clic en el botón comp-rural botón para empezar el análisis de los modelos de propagación para el terreno tipo de rural.
10. Analice la curva de perdida (pathloss) y conteste la siguiente pregunta.
11. Porque al aumentar la frecuencia aumenta el pathloss?
12. Introduzca la frecuencia de 2300 MHz, reduzca la altura de la antena transmisora (Tx) 15 mts, altura del dispositivo móvil (Rx) a 1.5 mts.
13. De clic en el botón comp-sub-urbano botón para empezar el análisis de los modelos de propagación para el terreno tipo de sub-urbano.
14. Analice la curva de perdida (pathloss) y conteste la siguiente pregunta.

15. Porque al reducir la altura de la antena transmisora (Tx) aumenta el pathloss?.
16. Introduzca la frecuencia de 2300 MHz, reduzca la altura de la antena transmisora (Tx) 15 mts, altura del dispositivo móvil (Rx) a 1.5 mts.
17. De clic en el botón comp-final botón para empezar el análisis de los modelos de propagación para todos los terrenos.
18. Analice la curva de perdida (pathloss) y conteste la siguiente pregunta.
19. Cual cree usted que es el mejor modelo de propagación para hacer un despliegue? Justifique su respuesta.

## Lista de Figuras

FIGURA 1.1: EFECTOS DE LA SUBCANALIZACIÓN. [2] .....	13
FIGURA 1.2: SUB-CANALIZACIÓN DE OFDM Y OFDMA. [2] .....	15
FIGURA 1.3: EJEMPLO DE TRES SUB-CANALES. [2].....	15
FIGURA 1.4: DOMINIO EN EL TIEMPO. [1] .....	16
FIGURA 1.5: REPRESENTACIÓN DE UN SÍMBOLO OFDM. [4] .....	17
FIGURA 1.6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE OFDMA TIEMPO/FRECUENCIA. [3].....	18
FIGURA 1.7: TRAMA OFDMA PARA TDD. [3] .....	19
FIGURA 1.8: MODULACIÓN ADAPTIVA AL SNR. [6] .....	20
FIGURA 1.9: ESTRUCTURA DE RED BASADA EN IP. [3].....	29
FIGURA 1.10: PUNTO DE REFERENCIA POR EL WIMAX FÓRUM. [9].....	32
FIGURA 2.1: CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN.[2].....	35
FIGURA 2.2: ENLACE CON LÍNEA DE VISTA / ZONA DE FRESNEL.[4].....	36
FIGURA 2.3: ENLACE SIN LÍNEA DE VISTA-NLOS.[2] .....	37
FIGURA 3.1: COMANDO GUIDE PARA CREAR LA GUI.[11] .....	44
FIGURA 3.2: PANEL DE OPCIÓN PARA CREAR LA GUI.[11] .....	45
FIGURA 3.3: FUNCIONES DENTRO DEL CODIGO DE LA GUI.[11].....	47
FIGURA 3.4: PROPERTY INSPECTOR.[11] .....	48
FIGURA 3.5: FUNCIÓN DE ENTRADA DE DATOS DE LA FRECUENCIA .....	50
FIGURA 3.6: FUNCIÓN DE ENTRADA DE DATOS DE LA ALTURA DE LA ANTENA TRANSMISORA.....	51
FIGURA 3.7: FUNCIÓN DE ENTRADA DE DATOS DE LA ALTURA DEL DISPOSITIVO MOVIL.....	51
FIGURA 3.8: FUNCIÓN DE SINCRONIZACIÓN DE DATOS. ....	52
FIGURA 3.9: CÓDIGO DEL MODELO SUI-A .....	53
FIGURA 3.10: GUI FINALIZADA. ....	54
FIGURA 4.1: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	56
FIGURA 4.2: ANÁLISIS COMPARATIVO .....	57
FIGURA 4.3: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	58
FIGURA 4.4: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	59
FIGURA 4.5: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	60
FIGURA 4.6: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	61
FIGURA 4.7: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	63
FIGURA 4.8: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	64
FIGURA 4.9: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	65
FIGURA 4.10: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	66
FIGURA 4.11: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	67
FIGURA 4.12: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	68
FIGURA 4.13: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	69

FIGURA 4.14: ANÁLISIS COMPARATIVO.....	70
FIGURA 5.1: ANÁLISIS DE PATHLOSS EN UN ÁREA URBANA.....	71
FIGURA 5.2: ANÁLISIS DE PATHLOSS EN UN ÁREA SUB-URBANA.....	72
FIGURA 5.3: ANÁLISIS DE PATHLOSS EN UN ÁREA RURAL.....	73

## Lista de Tablas

TABLA 1.1: PARÁMETROS PARA CAPAS FÍSICAS. [2] .....	11
TABLA 1.2: MODULACIONES Y CODIFICACIONES EN WIMAX. [9] .....	21
TABLA 1.3: TIPO QOS. [7] .....	27
TABLA 1.4: PARÁMETROS DE SISTEMA WIMAX MÓVIL [5] .....	32
TABLA 2.1: APLICACIÓN DE LOS MODELOS SUI EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE TERRENO.[10] .....	39
TABLA 2.2: PARÁMETROS PARA EL MODELO ERICSSON.[14] .....	41
TABLA 4.1: MODELO SUI-A URBANO.....	57
TABLA 4.2: MODELO SUI-B SUB-URBANO.....	59
TABLA 4.3: MODELO SUI-C RURAL .....	61
TABLA 4.4: MODELO ERICSSON 9999 URBANO. ....	64
TABLA 4.5: MODELO ERICSSON 9999 SUB-URBANO.....	66
TABLA 4.6: MODELO ERICSSON 9999 RURAL. ....	68
TABLA 4.7: MODELO DE ESPACIO LIBRE. ....	70

### **Lista de Acrónimos**

WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
HIPERMAN	High Performance Radio Metropolitan Area Network
PHY	Carrier Physical
MAC	Medium access control
TDM	Time-division multiplexing
NLOS	Non-line-of-sight
OFDMA	Orthogonal frequency division multiple access
TDD	Time division duplexing
AMC	Modulación y codificación Adaptiva
FCC	Federal Communications Comisión
ARQ	Automatic Repeat reQuest
FEC	Forward error correction
BE	Best Effort Service
AES	Advanced Encryption Standard
EAP	Enterprise Architecture Planning
VoIP	Voice over Internet Protocol
QoS	Quality of Service
DSL	Digital subscriber line
DVB-H	Digital Video Broadcasting - Handheld
ISI	Inter-symbol interference
FFT	Fast Fourier Transform
WiBro	Wireless Broadband
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
RtPS	Real-time Polling Service
NrtPS	Non-Realtime Polling Service
MPLS	Multiprotocol Label Switching
UGS	Unsolicited Grant Service

ERT-VR	Extended Real-Time Variable Rate Service
MS	Mobile Station
ASN	Access Service Network
CSN	Connectivity Service Network
ASN-GW	ASN Gateway
AAS	Adaptive Antenna System
AAAS	Authentication Authorization and Accounting server

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

Antes de empezar con las conclusiones debemos definir que el modelo de espacio libre se utilizó para dar una mayor comprensión al estudiante del porque se deben de utilizar modelos los cuales se adecuen al tipo de tecnología que se va a implementar en nuestro caso se utilizó WiMAX, el tipo de frecuencia y el tipo de terreno para el cual fue diseñado dicho modelo de propagación.

Nuestro análisis comparativo indica que para sistemas sin línea de vista (NLOS), todos los modelos de propagación presentan perdidas, sin embargo no existe ningún modelo que no presente perdidas de propagación en todos los tipos de terreno a los cuales fueron sometidos.

Según el análisis se determinó que al comparar las dos frecuencias: 2.3 GHz y 3.5Ghz a medida que se incrementó la frecuencia también incremento la perdida de propagación de forma que a 2.3 GHz se obtuvo el mejor resultado; con una altura de antena transmisora a 32m y la muestra a 2.5Km.

Continuando con el mejor resultado obtenido de este análisis (a 2.3Ghz), en el área Urbana el modelo de espacio libre fue el que presentó menor perdida de propagación (109.6 dB), el modelo SUI con (129.4 dB) y el modelo Ericsson 9999-urbano con (156.9 dB).

En el área Suburbana el modelo de espacio libre fue el que presentó menor perdida de propagación (109.6 dB), el modelo SUI con (122.4 dB) y el modelo Ericsson 9999-urbano con (179.3 dB)

En el área Rural el modelo de espacio libre fue el que presentó menor perdida de propagación (109.6 dB), el modelo SUI con (147.5 dB) y el modelo Ericsson 9999-urbano con (194.9 dB).



Los datos claramente muestran que el modelo de espacio libre presenta menor valor de pérdida de propagación, pero en este análisis y principalmente en WiMAX, decidimos que el modelo SUI posee los mejores resultados de pérdida de propagación en todos los escenarios propuestos del análisis, esto debido a que este modelo contempla una serie de parámetros para simular y evaluar la pérdida de propagación, como la definición de tres tipos de terreno: urbano suburbano y rural, también evalúa otros factores como: parámetros adecuados a cada tipo de terreno, factores de corrección de frecuencia, factores de corrección de altura de antena en el receptor, factores de corrección de shadowing, todo este conjunto de parámetros brindan una aproximación bastante aceptable a la vida real, y como modelo de espacio libre no toma en cuenta o contempla ninguno de estos parámetros, solo se limita a contemplar la distancia y frecuencia, se eligió el modelo SUI.

En este análisis el modelo Ericsson 9999, es el segundo modelo que recomendamos, sus pérdidas son un poco elevadas pero sus parámetros de evaluación superan al modelo de espacio libre. Las pérdidas son debidas a que este modelo es mayormente usado en tecnología GSM, por su rango de frecuencia de 150 a 1500MHz, en este análisis se observó esa corrección a 2.3GHz y 3.5 GHz, otra desventaja es que el modelo no contempla el desvanecimiento o (corrección de shadowing).

## **Recomendaciones**

La falta de parámetros como: los patrones específicos del terreno, condiciones de desvanecimiento, retardo y parámetros reales del despliegue WiMAX son valores que en algunos modelos de propagación no son contemplados o carecen en sus ecuaciones debido a que son modelos teóricos y empíricos.

Recomendamos el uso de herramientas profesionales de planeamiento para tener una apreciación más meticulosa de las condiciones de path loss ya que estas, requieren la configuración avanzada del entorno, y estos programas poseen valores más detallados a introducir junto con la capacidad de incorporar parámetros de la cartografía dependiendo del margen de error del mapa que se utilice , todos estos parámetros se integran para proporcionar datos más exactos para predecir las condiciones previas a un despliegue real.

Recomendamos añadir más modelos de propagación a la GUI, en especial el modelo COST 231, por ser recomendado por el foro WiMAX. Recomendamos realizar mediciones de campo, en áreas urbanas, suburbanas y rurales de Nicaragua, mediciones en sitio, esto para obtener resultados aún más exactos en un futuro análisis comparativo, esto se puede realizar en futuros trabajos monográficos para dar continuidad a este.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] "IEEE Std 802.16-2009 Air Interface for Broadband Wireless Access Systems," 13 May 2009 2009.
- [2] A. G. Jeffrey G. Andrews, Rias Muhamed., *Fundamentals of WiMAX, Understanding Broadband Wireless Networking*: Pearson Education, Inc., 2007.
- [3] "IEEE. Standard 802.16-2004. Part16: Air interface for fixed broadband wireless access systems.," October October 2004.
- [4] "IEEE. Standard 802.16e-2005. Part16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems—Amendment for physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed band. ," December 2005.
- [5] "WiMAX Forum. Mobile WiMAX—Part I: A technical overview and performance evaluation. White Paper. <http://www.wimaxforum.org>," March 2006.
- [6] "WiMAX Forum. Mobile WiMAX—Part II: A comparative analysis. White Paper. <http://www.wimaxforum.org>," April April 2006.
- [7] S. Ahson and M. Ilyas, *WiMAX Applications*: CRC Press 2008.
- [8] "IEEE Std 802.16 03-2004 Radio Conformance Test (RCT) for 10-66 GHz," p. 85, 25 June 2004 2004.
- [9] W. Forum, "WiMAX Forum® Network Architecture Stage 2: Architecture Tenets, Reference Model and Reference Points," p. 32, February 03, 2009 2009.
- [10] J. Milanovic, Rimac-Drlje, S. ; Bejuk, K., *Comparison of Propagation Models Accuracy for WiMAX on 3.5 GHz*.
- [11] Z. Abate, *WiMax RF Systems Engineering*: Artech House, 2009.
- [12] N. Shabbir, M. T. Sadiq, H. Kashif, and R. Ullah, "COMPARISON OF RADIO PROPAGATION MODELS FOR LONG TERM EVOLUTION (LTE) NETWORK," *International Journal of Next-Generation Networks*, vol. 3, 2011.
- [13] A. R. Mishra, *Advanced Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G...Evolution to 4G*: Wiley, 2007.
- [14] M. Alshami, T. Arslan, J. Thompson, and A. T. Erdogan, "Frequency analysis of path loss models on WIMAX," in *Computer Science and Electronic Engineering Conference (CEEC), 2011 3rd*, 2011, pp. 1-6.
- [15] *Matlab: The Language of Technical Computing. Building GUIs with Matlab version 5*: The MathWorks, 1997.
- [16] H. MOORE, *MATLAB® for Engineers, 3rd Edition*, 3rd Edition ed., 2011.